

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

***ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
UN CONVERTIDOR DE POTENCIA PARA
COCHE ELÉCTRICO***

Autor: Guillermo López Arias

Tutor: Pablo Zumel Vaquero

Leganés, Septiembre de 2014

AGRADECIMIENTOS

Quería agradecer a todas y cada una de las personas que me han ayudado en este complicado camino. En primer lugar, a mi tutor Pablo, por dejarme hacer el Trabajo de Fin de Grado con él, por tener la paciencia para aguantarme. He aprendido muchísimo contigo y no podré recordar mi paso por la Universidad sin acordarme de ti. También al profesorado que me ha hecho llegar hasta aquí con los conocimientos que tengo hoy en día.

A mis padres, por aguantarme mis cabreos cuando algo no salía bien, o mis agobios cuando se veía todo oscuro, y siempre poner ese punto de ilusión en que acabara la carrera. Gracias por ser así

A mi hermano David y a Gloria, por apoyarme incondicionalmente y por preocuparse de que todo fuera con calma y bien, habéis sido un gran apoyo, y sin vuestro ejemplo no creo que haya podido llegar aquí, a este punto.

A mi familia entera, a mi abuela Cesárea que me da muchísima rabia que no pueda verme acabar, siempre con su sonrisa en la boca, a mis abuelos Pepe y Carmen, que hasta han puesto velas a todos los santos con tal de que aprobara, y al final sirvieron. A mi tía María, por estar pendiente de apoyarme y echarme una mano siempre que las cosas no iban bien, y entenderme siempre, llevara razón o no.

A mis amigos, los que he hecho aquí (Eka, Eva, M^a Carmen, Pauli, Nacho, Esther, Sergi, Pablo, Celia, Alfredo), los que ya traía de antes (Ini, Petri, Moyano, Lau, George, Neto, Dani, Pati, Beu), y a los de la beca (Jorge, Victor, Borja, Cris, Albert, M^a José, Pepe) sabed que si he llegado hasta aquí es por vuestra culpa en gran medida, me encanta teneros cerca, y sencillamente sois los mejores.

Y en último lugar, y el más importante, a Reyes, por todo, por aplaudir y alegrarte en los buenos momentos, por no dejar de creer en mí, aun cuando yo ya habría tirado la toalla, por animarme en los momentos en los que todo parecía salir mal, y darme ese rayito de esperanza que me ha hecho seguir y llegar al final.

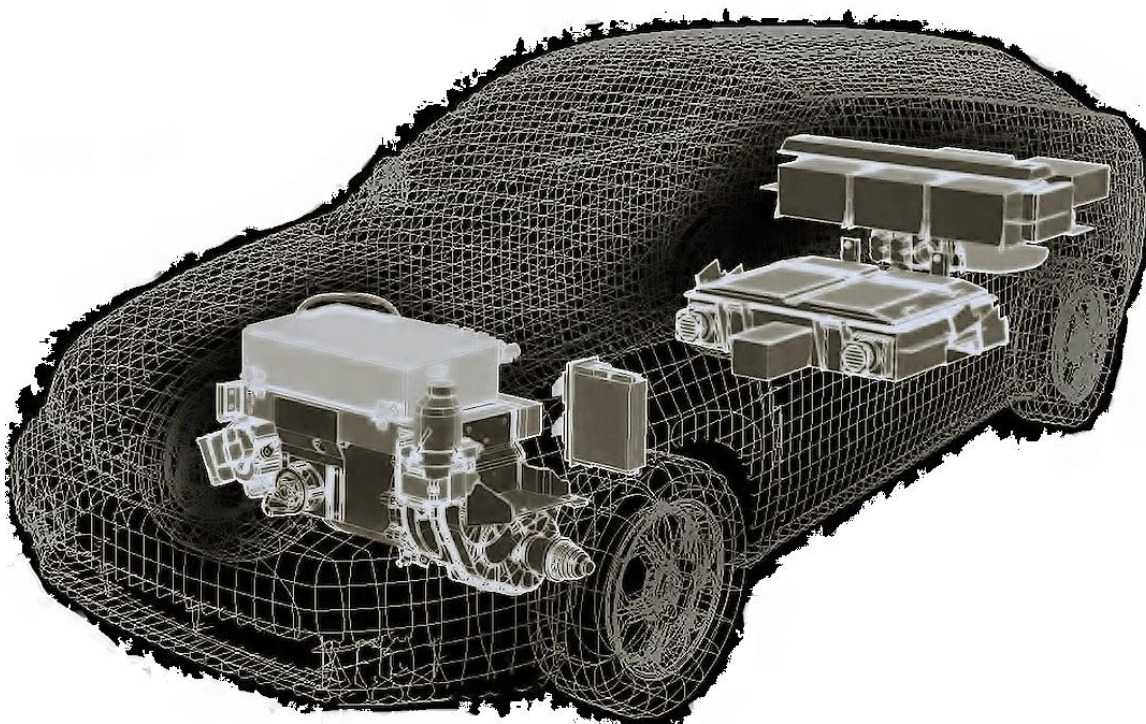
A todos vosotros, y a los que me dejo en el tintero, GRACIAS.



INDICE

Motivación y objetivos	6
Motivación	6
Objetivo.....	6
Estructura del documento	7
Introducción al coche eléctrico.	8
Importancia de coche eléctrico.	8
Problemas del coche eléctrico.	9
Precio.....	10
Recarga de la batería	11
Autonomía de la batería.....	12
Convertidor de potencia modular multi-puerto en un coche eléctrico	13
Elección del tipo de convertidor.	16
Análisis de los convertidores existentes.....	16
Convertidores sin aislamiento:	16
Convertidores con aislamiento (isolated converters):.....	20
Porqué un convertidor full bridge phase shift.	37
Por qué la asociación de convertidores como módulos	38
Ventajas de su uso	41
Inconvenientes de su uso	42
Parametrización del convertidor.....	43
Conexión de los módulos entre sí a la entrada y a la salida.	43
Cálculo de magnitudes de los módulos	45
Parámetros generales del convertidor:	45
Magnitudes de los componentes de cada módulo:	46
Uso de un único convertidor por módulos para carga de batería principal	47
Realización de un convertidor modular, a partir de convertidores pequeños	47
Control del convertidor	58
Control de la corriente de salida total, con la misma señal de consigna para la entrada de todos los módulos	58

Lazo de control cerrado de la corriente de salida de cada módulo, controlando individualmente la entrada de cada módulo	61
Control de la tensión de salida de cada módulo con referencia de corriente conjunta para los 4 módulos, y consigna para la entrada individual para cada módulo	71
Reconfiguración del convertidor de potencia para la carga de la batería auxiliar	80
Comprobación del acoplamiento del módulo 4 para la carga de la batería auxiliar	80
Análisis de la sensibilidad del módulo 4 al acoplamiento del apartado anterior	85
Conclusiones	87
Anexo I	90
Anexo II	91
Anexo III	92
Bibliografía	93





MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

MOTIVACIÓN

Uno de los principales retos de las marcas de automóviles es conseguir que el coche eléctrico sea una realidad y una alternativa real a los vehículos con motores térmicos. Para ello, hay ciertos obstáculos que aún deben ser sorteados, y algunos de ellos son:

- Abaratar el coste de producción
- Minimizar las pérdidas de los sistemas eléctricos de estos vehículos.
- Reducir el tiempo de recarga de sus baterías

Para ello se plantea en este trabajo, un modelo mejorado de un convertidor de potencia para la recarga de la batería principal del vehículo, así como la recarga de la batería auxiliar de 12 V que da alimentación a todos los componentes del vehículo como pueden ser, iluminación, sistemas de seguridad, etc.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es mejorar el convertidor de potencia que permite al coche eléctrico, en este caso, al modelo de Mitsubishi i-MiEV, cargar su batería principal y la batería auxiliar desde la red eléctrica.

Tomando como base los convertidores ya existentes en el vehículo mencionado, se tratará de realizar un único convertidor que haga las funciones de recarga de la batería principal, así como la recarga de la batería auxiliar de 12 V que tienen todos los vehículos. Se tratará de realizar un convertidor de potencia multi-puerto basado en cuatro módulos iguales, para conseguir un convertidor más económico, más sencillo, más flexible y más fiable que el que el i-MiEV posee en la actualidad.



ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente trabajo tratará de explicar, paso a paso, la construcción de un modelo de simulación, para más tarde ser implantado en un vehículo real, de un convertidor de potencia. Para ello, se estudiará qué tipo de convertidor es el más adecuado para este prototipo de vehículo. Más tarde se explicará qué es un convertidor modular, y se estudiará cómo realizar un modelo en simulación mediante el programa **PSIM** de simulación de circuitos electrónicos, realizando un control en lazo cerrado, para que el funcionamiento sea preciso y atienda a todas las demandas de potencia.

Una vez realizado el convertidor modular, se simulará el mismo, y se realizará un análisis de sensibilidad, introduciendo pequeños cambios en los módulos para ver la reacción del mismo, con la única función de recargar la batería principal del vehículo cuando lo conectamos a la red doméstica o al cargador rápido. Una vez analizado esto, se pasará a ampliar las funciones del convertidor para que éste recargue, una vez el vehículo está en marcha, la batería auxiliar de 12 V, desde la batería principal. Cuando se haya simulado esta nueva función, se hará un nuevo análisis de sensibilidad del convertidor ya completo.

Una vez analizado el convertidor, se realizarán las conclusiones del trabajo.

INTRODUCCIÓN AL COCHE ELÉCTRICO.

IMPORTANCIA DE COCHE ELÉCTRICO.

Aunque el coche eléctrico no sea una innovación, puesto que la idea de realizar un vehículo con propulsión eléctrica no nació precisamente en el siglo XXI, si no en el XIX [3], sí que es cierto que, ante la imposibilidad de almacenar la energía necesaria para alimentar ese motor eléctrico, el motor de combustión ha sido el empleado para la fabricación de vehículos, aun teniendo un rendimiento peor que los motores eléctricos, quedando los motores eléctricos para otro tipo de aplicaciones. Pero es a finales del siglo XX, y sobre todo a principios del siglo XXI, cuando el motor eléctrico vuelve a utilizarse en vehículos, movido por la necesidad de reducir las emisiones al medio ambiente, ya que el motor de combustión, con la búsqueda de petróleo, y los gases que suceden de la combustión de sus derivados, unido al gran número de automóviles que se mueven a diario en el mundo con este tipo de motores, han contribuido a deteriorar el medio que nos rodea, y la situación empieza a ser insostenible.



Ilustración 1: Imagen del primer coche eléctrico de la historia (31/08/1894) [3]

Es por ello por lo que los fabricantes de automóviles han decidido investigar en distintas nuevas vías para que el motor de combustión cada vez sea menos importante, y dar cabida

Estudio, diseño e implementación de un convertidor de potencia para coche eléctrico



a nuevas formas de conseguir el mismo fin que el motor de combustión, pero sin los defectos que presentan éstos. Se ha visto en los últimos años modelos híbridos, que integran un motor eléctrico para ayudar al motor de combustión, y en algunas fases, apagar éste para que el motor eléctrico mueva al vehículo por sí solo. Este tipo de propulsión en los vehículos se ha convertido en un tipo de motor más para elegir, como los que utilizan gasolina o diesel, y sin duda cada vez más fabricantes ven que el futuro cercano está en este tipo de motores.

Por otro lado se ha investigado también en pilas de combustible de hidrógeno, que prometen unos emisiones de CO₂ nulas, ya que las emisiones serían de vapor de agua, aunque el alto coste de la obtención del hidrógeno a gran escala, así como una tecnología aún muy novedosa y compleja, han hecho que este tipo de motores de momento no sean una alternativa real 100 % limpia y quede en un segundo plano al menos en un corto-medio plazo.

Pero la alternativa con 0% de emisiones y con posibilidades reales de mercado es realizar vehículos con motores eléctricos y alimentar estos mediante baterías de largo alcance. De hecho, ésta tecnología es una realidad hoy en día, y son pocos los fabricantes que no tienen en su catálogo al menos un modelo con este tipo de motor. A parte de la ausencia de emisiones contaminantes directas a la atmósfera, la ausencia de ruidos mecánicos procedentes del motor, y la respuesta de éste ante los requerimientos del conductor (con el 100 % de par en toda la gama de revoluciones) hacen que el coche eléctrico sea una realidad hoy en día, y que en el futuro próximo se convertirá en una alternativa para el motor de combustión.

PROBLEMAS DEL COCHE ELÉCTRICO.

Aunque el coche eléctrico sea una alternativa real al vehículo tal y como se conoce hoy en día (con motor de combustión), aún quedan obstáculos para que esta alternativa se convierta en realidad y plante cara, e incluso mejore el resultado que dan los coches de combustión.

Es cierto que el motor eléctrico presenta grandes ventajas frente a los motores de combustión, y la más importante es el rendimiento (en un motor de combustión es difícil

que éste sea mayor de un 50%, mientras que en los motores eléctricos, lo difícil es que el rendimiento esté por debajo del 90%) [8], pero todavía queda mucho camino por recorrer para esta tecnología.

A continuación se detallan los problemas que presenta el coche eléctrico hoy en día.

PRECIO

Es quizá el mayor inconveniente hoy en día, debido a la crisis económica mundial que se está sufriendo.

El coche eléctrico, es una tecnología incipiente con un mercado en auge aunque sin grandes incrementos de demanda, lo que se traduce en series muy limitadas de fabricación. Este tipo de producción de tecnología hace que la compra de cada uno de estos vehículos no resulte ni mucho menos económica.

El coche que se estudia en este trabajo, el Mitsubishi i-MiEV [1], es un coche utilitario, muy pequeño, con una potencia baja.



Ilustración 2: Imagen del Mitsubishi i-MiEV

En cuanto al coste del utilitario en España, incluso contando las ayudas económicas que el Gobierno ofrece por la compra de uno de estos vehículos, es de 28.400 € [1] (el coche más barato de este tipo eléctrico es el Renault Zoe que cuesta 21.250 € [8]). Si se compara este precio, con un coche similar con motor de gasolina que suele rondar los 10.000 € [8], queda bastante claro, que es una tecnología que a día de hoy sigue resultando poco económica.



Ilustración 3: Imagen del Renault Zoe

RECARGA DE LA BATERÍA

Otro de los escollos de esta tecnología es que, hasta el momento, el único método de recarga de la batería es mediante la conexión de un cable bien a la red eléctrica doméstica o bien a un cargador rápido que debe conectarse a la red eléctrica. Es por ello, por lo que son necesarios muchísimos puntos de recarga, para que la batería que alimenta al motor eléctrico se pueda recargar.

Por el momento, existen muy pocos punto de recarga públicos, donde se pueda recargar dicha batería, debido a la poca demanda de vehículos de este tipo.

Es posible un análisis análogo, y es que al menos en nuestro país, uno de los posibles motivos de esa poca demanda de coches eléctricos es debida a la poca infraestructura existente para la recarga de este tipo de vehículos.



Ilustración 4: Punto de recarga de Endesa para coche eléctrico

AUTONOMÍA DE LA BATERÍA

Es quizá el problema en el que los fabricantes están investigando con más empeño. Y es que, la poca autonomía que ofrecen las baterías de estos coches, todavía con tecnologías muy recientes e innovadoras, no permiten que éstos tengan un alcance de más de 100-150 km [8], lo que hace al vehículo poco utilizable para largos recorridos. Si a esto se suma que el tiempo mínimo de recarga de la batería mediante un cargador rápido es de 4-6 horas [8], y en una red doméstica de 8-12 horas [8], esto complica bastante la decisión de compra de un coche eléctrico frente a uno de motor de combustión (autonomía media de 400-600 km y tiempo de rellenado del depósito 5-10 minutos).

CONVERTIDOR DE POTENCIA MODULAR MULTI-PUERTO EN UN COCHE ELÉCTRICO

Para el presente trabajo se estudiará un convertidor multi-puerto modular, para su implantación en un vehículo eléctrico. Este convertidor se incluirá entre el rectificador de onda que ya posee el vehículo y las baterías, tanto principal como auxiliar. En el siguiente esquema se puede apreciar dónde iría colocado el convertidor que se está estudiando (recuadro de color rojo):

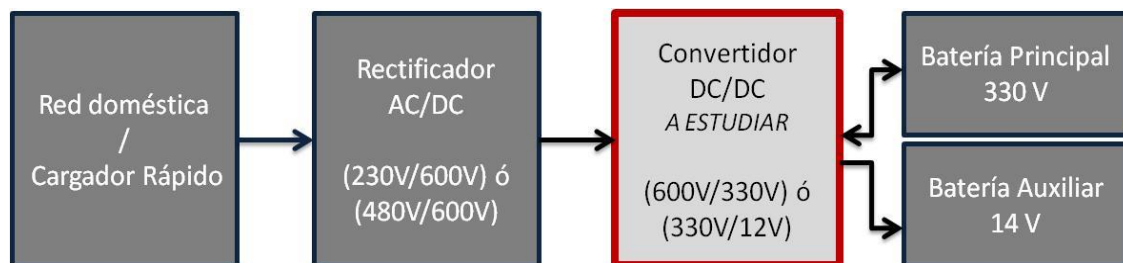


Ilustración 5: Situación del convertidor modular a estudiar

Las características básicas del convertidor (explicadas en el apartado 4) serán:

- Tensión de entrada: 600 Vdc
- Tensión de salida: 330 Vdc (14 Vdc)
- Potencia total: 3,3 kW
- Tensión de entrada por módulo: 300 Vdc
- Tensión de salida por módulo: 82,5 Vdc
- Frecuencia de conmutación: 20 kHz

En la ilustración número 5 se puede apreciar dónde irá colocado el convertidor, y se pueden observar los puertos de entrada (red y batería principal) y de salida (batería principal y batería auxiliar) con los flujos de potencia que se realizarán en el convertidor.

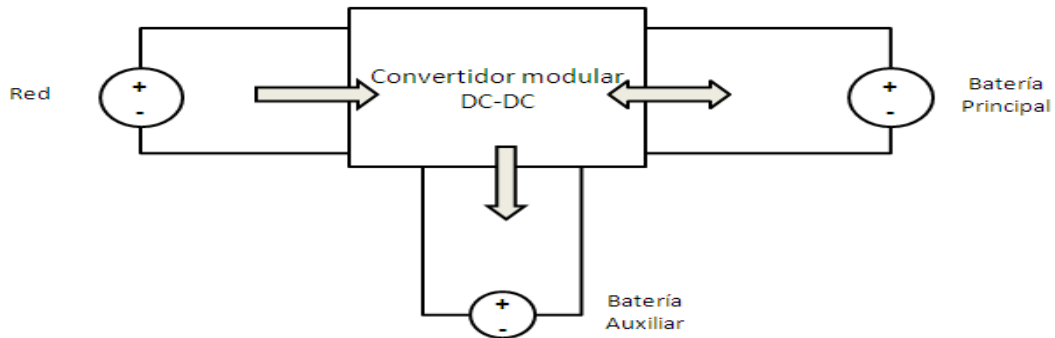


Ilustración 5: Convertidor de potencia multi-puerto

En la siguiente ilustración se pueden ver de forma detallada los distintos módulos que forman parte del convertidor modular, en la configuración en la que la recarga se hace desde la red, hacia la batería principal, con las conexiones de entrada y de salida que se utilizarán (explicadas más adelante).

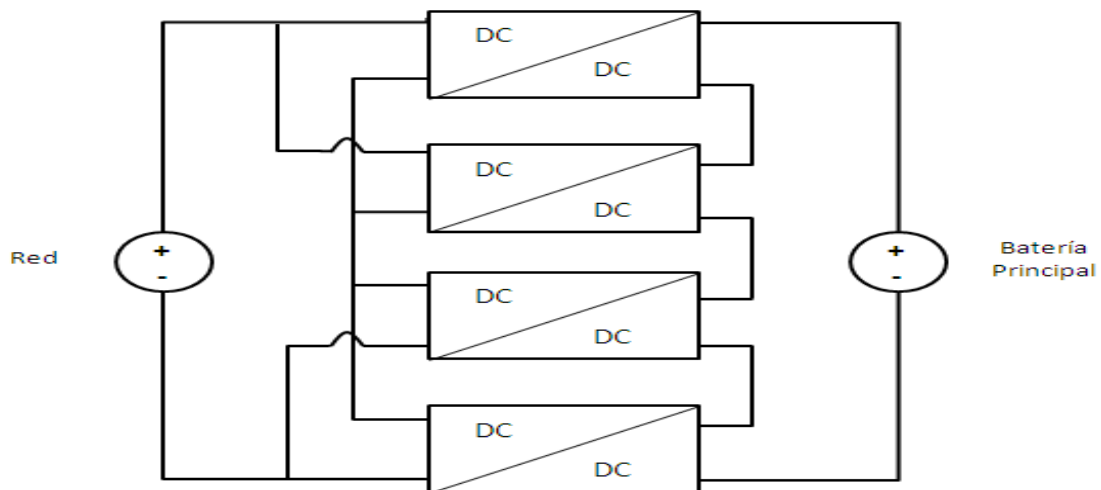


Ilustración 6: Configuración del convertidor modular para la recarga de la batería principal

A continuación se puede apreciar la configuración que toma el convertidor cuando el vehículo se desconecta de la red y recarga la batería auxiliar desde la batería principal.

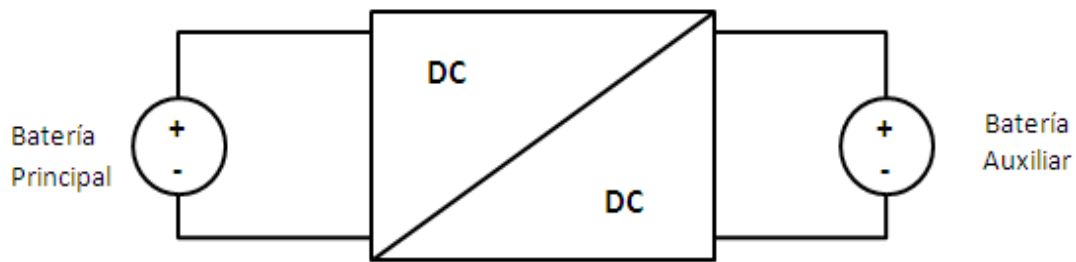


Ilustración 7: Reconfiguración del convertidor para la recarga de la batería auxiliar desde la batería principal

Se aprecia como para la recarga de la batería auxiliar, sólo se necesita un único módulo, mientras que para la recarga de la batería principal deben de ser los 4 módulos los que actúen en conjunto, para la transferencia de potencia desde la red hacia la misma. Para ello, se explicará en los apartados 5 y 6 del presente trabajo, cómo se ha de construir el convertidor para que los módulos trabajen como se requiere en cada instante.

ELECCIÓN DEL TIPO DE CONVERTIDOR.

ANÁLISIS DE LOS CONVERTIDORES EXISTENTES.

En este apartado se estudiarán de una forma breve los diferentes tipos básicos de convertidores de potencia de DC-DC con el fin de poder explicar la elección de un convertidor de puente completo con desplazamiento de fase (Full Bridge Phase Shifter Converter):

CONVERTIDORES SIN AISLAMIENTO:

CONVERTIDOR BUCK [2]:

El convertidor Buck tiene un único interruptor, que puede ser un MOSFET, en el cual, cuando está en modo ON, la entrada está conectada a la salida por medio de la bobina L, y cuando el interruptor está en modo OFF o abierto, la energía almacenada en la bobina L pasa a través del diodo hasta la salida. En la siguiente figura, se puede ver la forma que presenta este convertidor

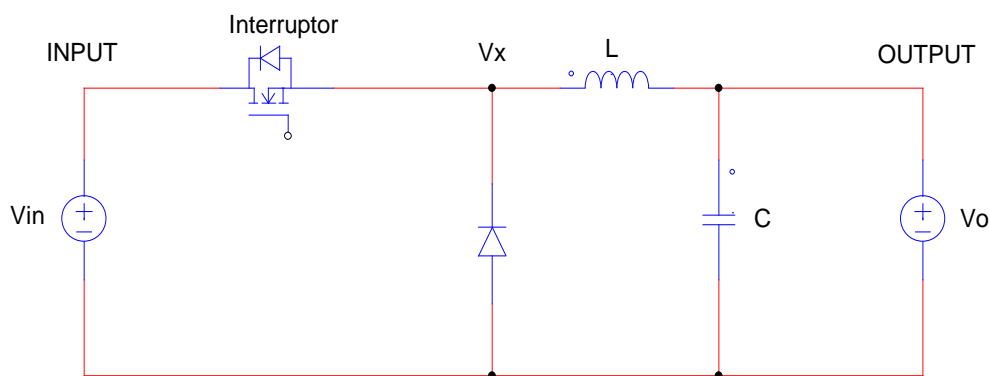


Ilustración 8: Convertidor tipo Buck

En este tipo de convertidor, la tensión de salida es proporcional al ciclo de trabajo del interruptor con la siguiente relación:

Estudio, diseño e implementación de un convertidor de potencia para coche eléctrico

$$V_o = D \cdot V_{in}$$

La potencia de entrada y salida debe satisfacer:

$$V_o \cdot I_o = V_{in} \cdot I_{in}$$

Siendo:

- V_o = Tensión a la salida del convertidor
- V_{in} = Tensión a la entrada del convertidor
- I_o = Corriente de salida del convertidor
- I_{in} = Corriente de entrada del convertidor
- D = Ciclo de trabajo

CONVERTIDOR BOOST [2]:

Este convertidor se utiliza cuando se requiere una tensión superior a la salida que a la entrada del convertidor. El convertidor Boost tiene la siguiente estructura:

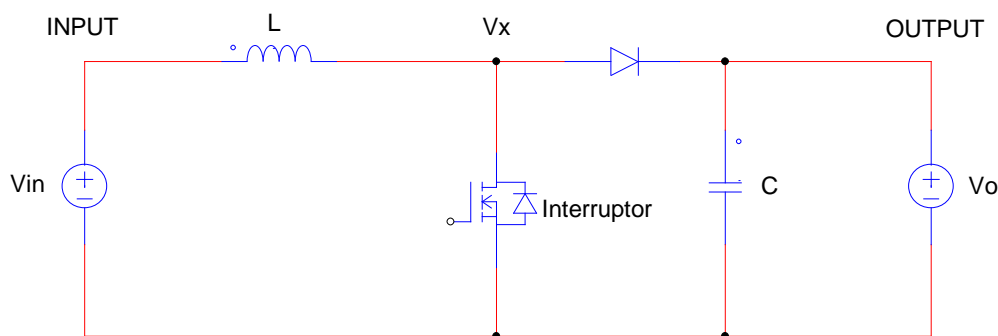


Ilustración 9: Convertidor tipo Boost [2]

Cuando el interruptor está en modo ON (cerrado), la tensión V_x es la tensión V_{in} , mientras que cuando el interruptor está en modo OFF (abierto), la corriente almacenada en

la bobina fluye a través del diodo, dando como resultado que la tensión V_o es igual a la tensión V_x . Este análisis es válido siempre que el convertidor trabaje en modo de conducción continuo, es decir, que la corriente que pasa por la bobina nunca es 0

En este tipo de convertidor se ha de cumplir:

$$V_{in} \cdot t_{on} + (V_{in} - V_o) \cdot t_{off} = 0;$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{(1 - D)};$$

$$\frac{I_o}{I_{in}} = (1 - D)$$

Siendo:

- V_o = Tensión a la salida del convertidor
- V_{in} = Tensión a la entrada del convertidor
- I_o = Corriente de salida del convertidor
- I_{in} = Corriente de entrada del convertidor
- D = Ciclo de trabajo
- T = Periodo de la onda
- t_{on} = Tiempo en el que el interruptor está en modo ON o cerrado
- t_{off} = Tiempo en el que el interruptor está en modo OFF o abierto.

CONVERTIDOR BUCK-BOOST [2]:

Con este tipo de convertidor, en modo de conducción continua, que es el modo de conducción más interesante para este Trabajo, cuando el interruptor está en modo ON V_x es V_{in} , mientras que si el interruptor está en modo OFF, V_x es igual a V_o . Se puede observar en la siguiente figura, el aspecto de este convertidor:

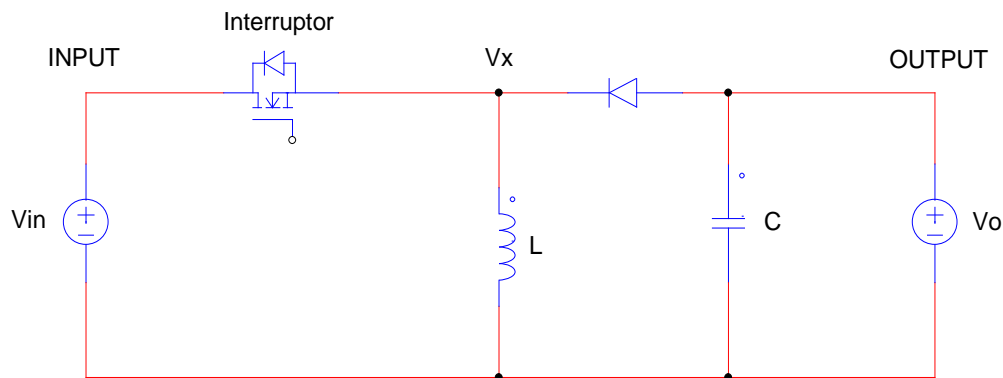


Ilustración 10: Convertidor tipo Buck-Boost

En el convertidor tipo Buck-Boost, se deben de cumplir las siguientes premisas:

$$V_{in} t_{ON} + V_{in} t_{OFF} = 0;$$

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{D}{(1 - D)};$$

$$\frac{I_0}{I_{in}} = \frac{(1 - D)}{D}$$

Siendo:

$V_{in} t_{ON}$ = Tensión de entrada cuando el interruptor se encuentra en modo ON o cerrado

$V_{in} t_{OFF}$ = Tensión de entrada cuando el interruptor se encuentra en modo OFF o abierto

V_0 = Tensión a la salida del convertidor

V_{in} = Tensión a la entrada del convertidor

I_0 = Corriente de salida del convertidor

I_{in} = Corriente de entrada del convertidor

D = Ciclo de trabajo



La tensión de salida del convertidor puede variar tanto que hasta puede llegar a ser mayor o menor que la tensión de entrada, mientras que el ciclo de trabajo D se mueve entre 0 y 1.

Los convertidores vistos hasta ahora, se suelen emplear en aplicaciones con potencias muy bajas, de en torno a 100-200 W, siendo su máximo 500 W [2]. Es por ello por lo que este tipo de convertidores vistos hasta ahora sin aislamiento, no son válidos para el caso de estudio del presente Trabajo.

A continuación se estudiarán los convertidores con aislamientos, que soportan mayores potencias, tensiones y corrientes que los hasta ahora estudiados.

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO (ISOLATED CONVERTERS):

En muchas de las aplicaciones con entrada y salida en corriente continua, se requiere más de una salida del convertidor, y en ocasiones es necesario un aislamiento en la salida. Además, el aislamiento entre la salida y la entrada por medio de un transformador, es necesario para una mayor seguridad. Los convertidores vistos hasta ahora, pueden ser adaptados para tener aislamiento entre la salida y la entrada.

CONVERTIDOR FLYBACK [4]:

El convertidor tipo Flyback se puede considerar una reconfiguración del convertidor anterior, el Buck-Boost, introduciendo un elemento aislador como puede ser un transformador.

La transformación entre un Buck-Boost y un Flyback se realiza duplicando la bobina L del Buck-Boost, en dos bobinas paralelas, cuya inductancia sea equivalente a la anterior bobina. Sin cambiar el ratio de tensión entre la entrada y la salida del convertidor Buck-Boost: $\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{D}{(1-D)}$, podemos romper la estructura de las dos bobinas en paralelo en dos arrollamientos de un transformador de relación 1:1 obteniendo así una estructura aislada.

Si se desea realizar un cambio en el ratio de tensión entre la entrada y la salida del convertidor, podemos variar el número de vueltas tanto del lado primario del transformador (N_p) como para el secundario (N_s).

Para terminar de modificar el Buck-Boost para que sea un Flyback, se debe invertir la polaridad del arrollamiento secundario, para no obtener una tensión invertida en la salida, además se debe de variar la polaridad del diodo de salida, para permitir la circulación de corriente en ese lado. Por último, se debe de variar la posición del interruptor de modo que se conecte su terminal de alimentación al lado de tierra del primario. Se puede ver en la siguiente secuencia de figuras el cambio entre el convertidor Buck-Boost y el resultante Flyback:

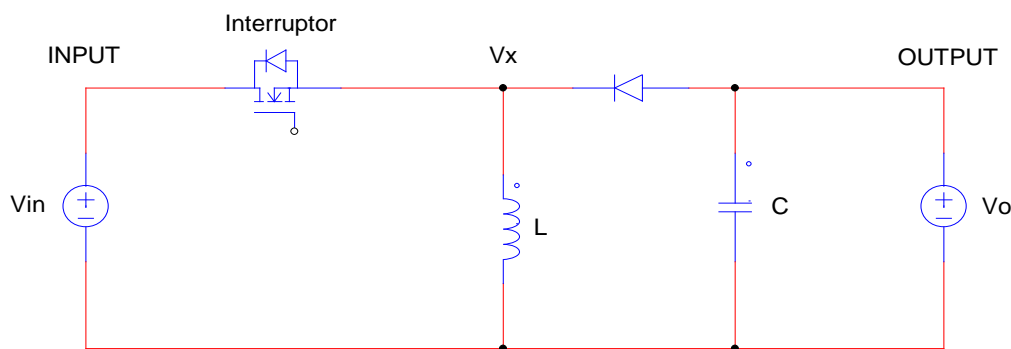


Ilustración 11: Convertidor tipo Buck-Boost

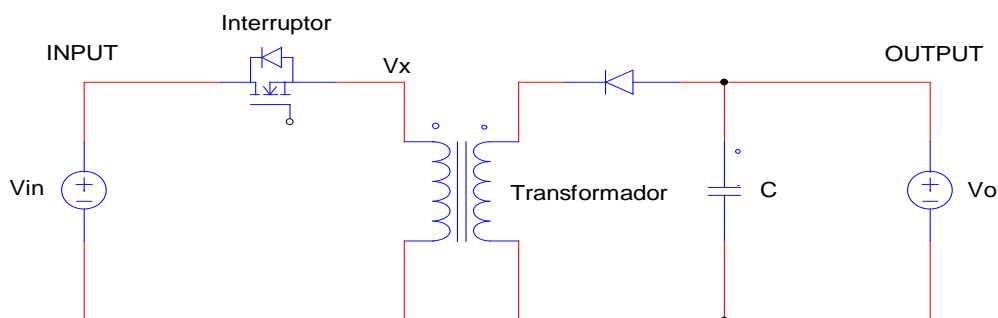


Ilustración 12: Convertidor tipo Buck- Boost, cambiando la bobina por un transformador

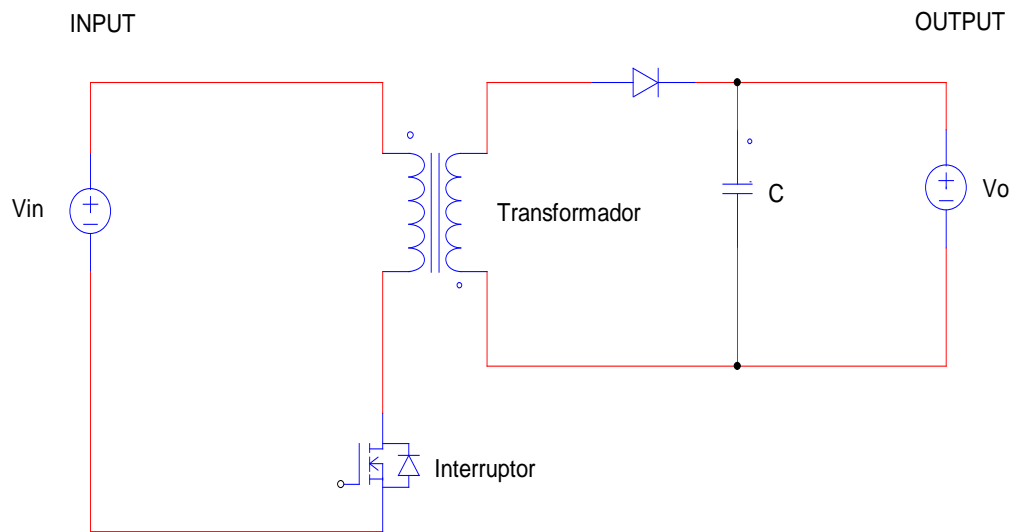


Ilustración 13: Convertidor Flyback

Es uno de los convertidores más antiguos conocidos. Algunos historiadores afirman que Hertz utilizaba un convertidor Flyback muy básico ya en el siglo XIX para demostrar la existencia de ondas electromagnéticas. De hecho, las raíces operativas de este convertidor se pueden encontrar también en el sistema de ignición del vehículo Ford Model T, a principios del siglo XX.

El convertidor Flyback es uno de los más utilizados en los circuitos con aplicaciones de baja potencia. Su gran flexibilidad, ya que pueden añadirse arrollamientos para crear nuevas salidas hace que sea de gran utilidad, sobre todo para aplicaciones de entre 20 W y 500 W, desde cámaras digitales hasta adaptadores de reproductores DVD, televisiones, monitores de ordenador, impresoras, etc. Es utilizado en aplicaciones con potencias bajas y tensiones de entrada altas, y suelen acompañarse con un rectificador de corriente alterna. De todos modos, su eficiencia no es buena, si no más bien todo lo contrario, por lo que no se utiliza en circuitos con potencias medias-altas. Es por lo cual, un convertidor de este tipo, no es aconsejable para un convertidor en un vehículo eléctrico, donde la eficiencia es lo primordial y además, se necesita manejar una potencia muy alta.

El funcionamiento del convertidor es el siguiente. Cuando el interruptor está en modo ON (cerrado), la tensión de entrada pasa por el arrollamiento primario del transformador, con lo cual, a la salida se tiene la tensión que dependa de la relación del transformador.

Cuando el interruptor está en modo OFF o abierto, la corriente de entrada es 0, aunque la corriente magnetizante tiene que seguir circulando. Esto causa una circulación de corriente en lado secundario que pasa por el diodo, llegando a la salida del convertidor. Esto ocurre porque la corriente magnetizante polariza el arrollamiento primario de forma análoga a como lo hacía en el modo ON del interruptor, creando una corriente con sentido contrario en el secundario.

Las fórmulas que rigen el funcionamiento de este convertidor son las siguientes:

Para la tensión:

$$V_{in} \cdot D + \left(-\frac{N_p}{N_s} V_o\right) (1 - D) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \frac{N_s}{N_p}$$

Para la corriente:

$$\frac{I_{in}}{I_o} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \frac{N_s}{N_p}$$

$$I_m = \frac{I_{in}}{D} = \frac{1}{1 - D} \frac{N_s}{N_p} I_o$$

Siendo: V_{in} = Tensión de entrada del convertidor

V_o = Tensión de salida del convertidor

D = Ciclo de trabajo del interruptor

N_p = Número de espiras en el lado primario del transformador

N_s = Número de espiras en el lado secundario del transformador

I_{in} = Corriente de entrada del convertidor

I_o = Corriente de salida del convertidor

I_m = Corriente magnetizante

CONVERTIDOR FORWARD [4]:

El convertidor forward, es en esencia un convertidor tipo Buck como el estudiado anteriormente, con un aislamiento mediante un transformador. Si únicamente se introdujera un transformador al convertidor Buck, el diodo cortocircuitaría al devanado secundario del transformador. Para evitar esta situación, se incorpora otro diodo, para que cuando el diodo del convertidor Buck esté conduciendo, el otro diodo permanezca en estado de no circulación. De esta forma, ya no se cortocircuita el secundario y se obtendrá una tensión a la salida.

Por otro lado, existe el problema de la corriente magnetizante, ya que cuando el interruptor esta en modo ON (cerrado), la corriente fluye por el primario, entrado por el nodo * del primario del transformador, y a su vez fluirá una corriente magnetizante. Una vez que el interruptor está en modo OFF (abierto), la corriente magnetizante debe continuar circulando para evitar un corte repentino de la corriente en una bobina.

Esta corriente buscará el sitio más sencillo para circular, que será la resistencia parásita del devanado, causando pérdidas y calor, así que, si se deja que esa pérdida y calor se vaya produciendo en cada periodo, ésta corriente llegará a saturar el núcleo del transformador, ya que cada vez será más grande. Es por ello por lo que se debe hacer un “reset” del núcleo, que se consigue añadiendo un terciario a la entrada con un diodo, para así permitir un camino a la corriente magnetizante, llevándola a cero en cada periodo.

Una vez conseguido esto, se puede evitar otro problema del convertidor Buck, que es colocando el interruptor con su lado de no alimentación al lado de tierra del convertidor.

A continuación se pueden observar los cambios que se van produciendo en el convertidor Buck (incluyendo el transformador) hasta llegar a la configuración del convertidor Forward:

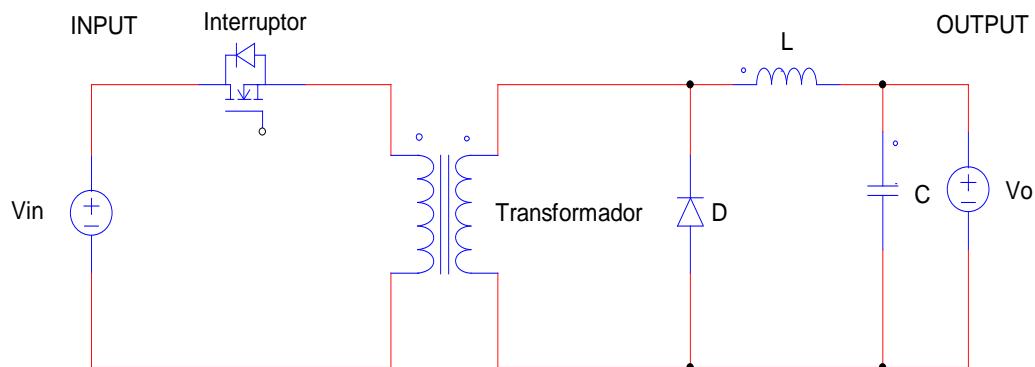


Ilustración 14: Convertidor Buck con transformador incluido

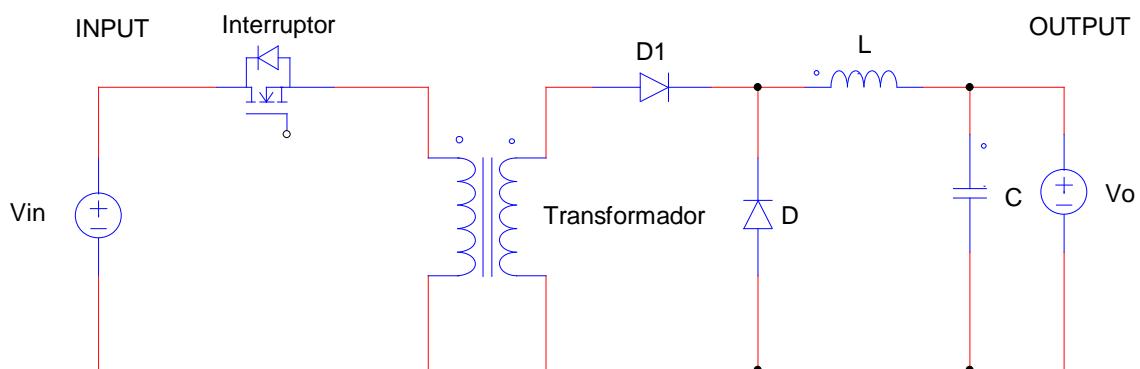


Ilustración 15: Configuración del Buck con transformador con dos diodos a la salida

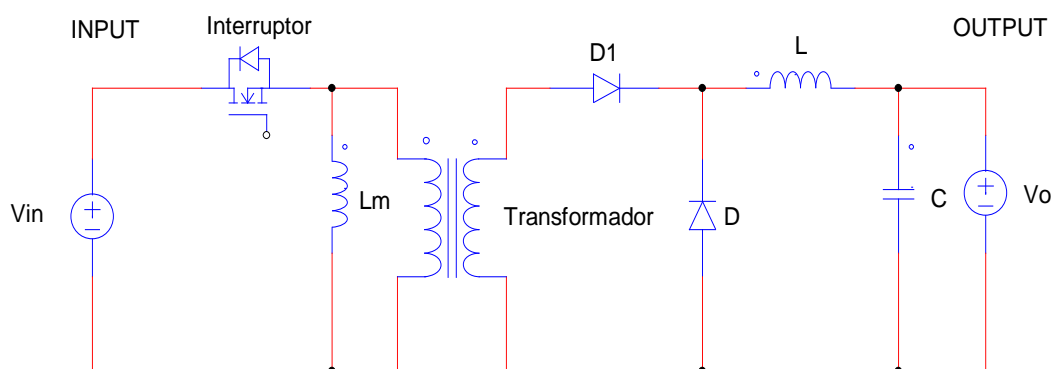


Ilustración 16: Introducción de la bobina magnetizante al convertidor de arriba

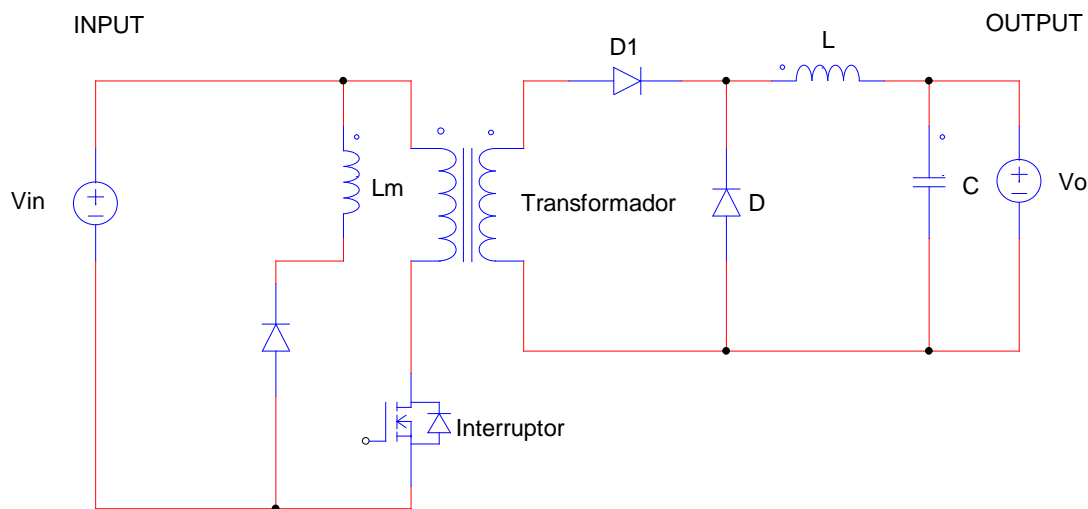


Ilustración 17: Convertidor Forward

Cuando el interruptor está en modo ON, una parte de la corriente de entrada circula por el lado magnetizante del transformador, y parte por el devanado primario. La corriente que circula por el primario, por el nodo * del mismo, induce una corriente en el secundario que circula por el diodo D_1 , ya que sale por el lado * del secundario. El diodo D no conduce, y esa misma corriente circula por la salida.

Una vez que el interruptor pasa a estar en modo OFF o abierto, la corriente magnetizante continua circulando en la misma dirección, con lo cual, en el lado primario, la corriente en este instante de tiempo entra en sentido contrario al estado anterior, con lo cual sale por el lado * del devanado, en vez de entrar.

Esto induce una corriente en el lado secundario de sentido opuesto, es decir, que el diodo D_1 deja de conducir, para ser el diodo D el que conduzca en este instante, haciendo que esa corriente pase por el filtro LC de la salida y llegando en forma continua a la salida del convertidor.

Cabe destacar que esta corriente en este instante no es la relacionada con la corriente de entrada en el convertidor, si no que es inducida por la corriente magnetizante (I_m). Gracias al diodo D_2 , se permite la circulación de esta corriente magnetizante, y ésta no se pierde en forma de calor.

Cabe destacar que el estrés que sufre el interruptor en un convertidor forward es mucho mayor que el que sufre el mismo interruptor en un convertidor tipo Buck, además si el

número de espiras en la bobina de terciario añadido a la entrada del transformador es igual al número de espiras del primario del transformador, este estrés es justamente el doble que en el caso de un tipo Buck.

Estos son aspectos a tener en cuenta, pues son las desventajas de tener un aislamiento entre la entrada y la salida del convertidor.

Las ecuaciones que rigen el funcionamiento de este tipo de convertidor son:

$$V_o = \frac{N_s}{N_p} V_{in} - v_L$$
$$I_{Lm\acute{a}x} = I_{om\acute{a}x} = I_{Lm\acute{i}n} + \frac{1}{L} \left(\frac{N_s}{N_p} V_{in} - V_o \right)$$

CONVERTIDOR PUSH-PULL [4] [7]:

Para incrementar el nivel de potencia de estos convertidores, se debería de poder tener una utilización mayor del núcleo del transformador. Si el flujo magnético, así como la corriente magnetizante, tienen ambos valores positivos y negativos, se puede utilizar la totalidad de la curva B-H, así que el núcleo por completo se va a utilizar magnéticamente, pudiendo así utilizar un transformador de tamaño menor para una potencia dada. Es por ello además, por lo que en este caso ya se introduce un nuevo interruptor.

El convertidor Push-Pull se puede ver como dos convertidores Forward operando con fase contraria el uno del otro. El lado primario del circuito pasa a tener dos interruptores, operando en anti fase, de ahí viene el nombre de push and pull. El problema que tiene este convertidor, es que para evitar situaciones anómalas, cada interruptor puede trabajar con un ciclo de trabajo máximo de 0,5, y además entre el cierre de uno y la apertura del otro, se debe de dejar un tiempo muerto entre S1 y S2 de al menos el tiempo necesario para que S1 se abra. Los interruptores de este convertidor están referenciados a tierra, y además se tratarán los dos bobinados primarios del transformador como si fueran independientes, con el mismo número de espiras en los dos bobinados. Por otro lado, se tienen dos devanados secundarios en lugar de uno como se ha visto hasta ahora, ya que es necesario a partir de ahora en los convertidores que se van a estudiar. En el caso del lado secundario, los dos

bobinados también tendrán el mismo número de espiras y sus referencias estarán en el mismo lado, al igual que en los devanados primarios. A continuación se puede ver la configuración que adopta este convertidor:

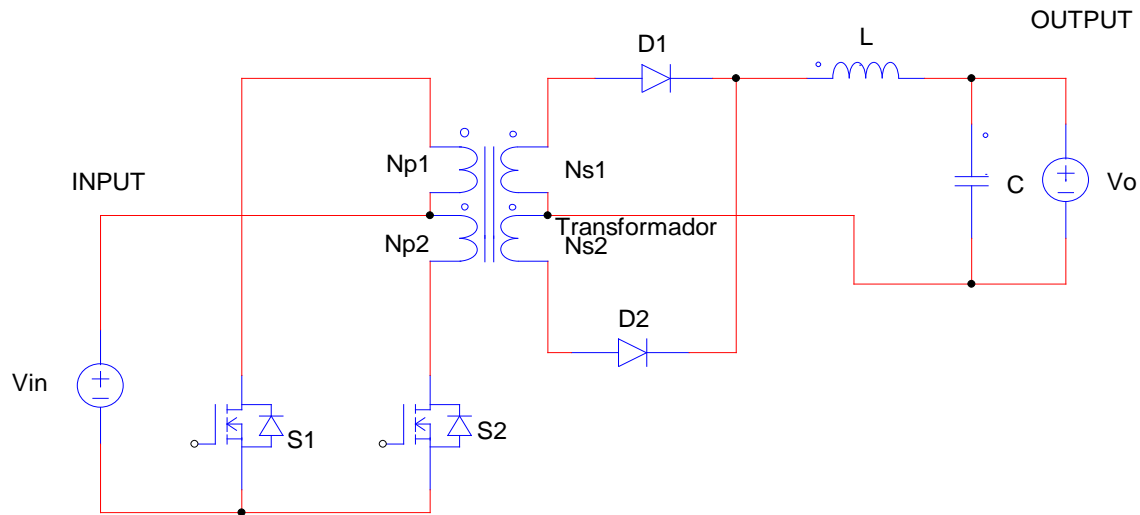


Ilustración 18: Convertidor Push-Pull

En este convertidor, cuando S1 está en modo ON, empezando un nuevo ciclo, y S2 está en modo OFF, el interruptor S1 permitirá el paso de corriente para que la corriente de entrada procedente de la fuente V_{in} pase por el bobinado N_{p1} , entrando por el lado común de los dos bobinados, y saliendo por el terminal * del mismo, induciendo una corriente en el secundario N_{s2} , que circulará por el diodo D2, y al no dejar D1 circular ninguna corriente por sus terminales, ésta corriente secundaria pasará por el filtro LC, llegando a la carga o la batería V_o .

En este estado, la tensión que se ve en la bobina cumple lo siguiente:

$$V_L = V_{in} \frac{N_{s2}}{N_{p1}} - V_o$$

Siendo: V_L = Tensión vista en bornas de la bobina

V_{in} = Tensión de entrada del convertidor

$\frac{N_{s2}}{N_{p1}}$ = Relación de transformación entre N_{p1} y N_{s2}

V_o = Tensión de salida del convertidor

De forma análoga, cuando S2 está en modo ON y S1 está en modo OFF, esto acarrea que D2 esté en inverso y que D1 esté en modo directo, con lo cual, S2 permite la circulación de corriente entre sus bornas, dejando que la corriente de entrada de V_{in} pase por el bobinado N_{p2} , entrado por el lado * y bajando hasta S2 de nuevo. Esto induce una corriente en el secundario N_{s1} , que circulará por el diodo D1 y no por el diodo D2, pasando por el filtro LC y llegando hasta la carga o la batería V_o . En este estado, la tensión que se ve en bornas de la bobina cumple la ecuación del estado anterior, solo que la relación de transformación será ahora entre N_{p2} y N_{s1} , en lugar de entre N_{p1} y N_{s2} .

Cuando los dos interruptores están en modo OFF, por su conmutación, la corriente que queda almacenada en los bobinados secundarios, pasarán a través de los diodos D1 y D2 que estarán en modo directo, y esta corriente pasará por el filtro LC, llegando hasta la carga o batería V_o . Esta corriente retornará por el lado común de los dos bobinados, cerrando así el circuito. En este estado se cumple:

$$V_L = -V_o$$

Para este convertidor, a parte de las ecuaciones anteriores, se cumple para la tensión:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot 2D$$

Y para la corriente:

$$P_{in} = P_o$$

$$V_{in} \cdot I_{in} = V_o \cdot I_o$$

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{V_o} = \frac{N_p}{N_s} \frac{1}{2D}$$



Siendo:

P_{in} = Potencia de entrada

P_o = Potencia de salida

V_{in} = Tensión de entrada

V_o = Tensión de salida

N_p = Número de espiras en el primario

N_s = Número de espiras en el secundario

D = Ciclo de trabajo

I_{in} = Corriente de entrada

I_o = Corriente de salida

CONVERTIDOR HALF-BRIDGE [4][7]:

El lado primario del convertidor de Medio Puente o Half-Bridge, contiene dos interruptores y dos condensadores de bloqueo de la corriente continua. Estos dos condensadores, se utilizan para dividir la tensión en el primario de manera idéntica entre las dos ramas con interruptores. Dicha tensión, considerada como $V_{in}/2$, se mantiene constante además, por causa de estos condensadores. Como toda la corriente de entrada pasa a través de estos condensadores, son bastante grandes y costosos normalmente.

Este tipo de convertidores se utilizan para aplicaciones de hasta 1 kW. Este tipo de convertidor, es un tipo Buck bastante modificado. Los dos interruptores trabajan uno en modo ON y el otro en modo OFF, complementariamente, con condiciones de conducción iguales entre sí.

Como esto hace que las corrientes magnetizantes en el núcleo del transformador sean tanto positivas como negativas, ello produce que la totalidad de la curva B-H del transformador se utilice, con lo cual, se realiza una correcta utilización del núcleo. Una de las desventajas de este convertidor, es que aunque el ciclo máximo de trabajo ideal o teórico

sea de 0,5, en la realidad, no se puede utilizar la totalidad del mismo, viéndose este valor reducido a un valor menor. Como pasa en el convertidor tipo Push-Pull, estudiado anteriormente, en este convertidor se necesita un tiempo muerto entre el cierre de un interruptor y la apertura del otro, de un tiempo al menos igual al de conmutación.

El funcionamiento de este convertidor, como se verá a continuación, es muy similar al convertidor tipo Push-Pull, aunque la tensión en el primario en este caso se reduce a la mitad. A continuación se explica el funcionamiento:

Cuando S1 está en modo ON y S2 está en modo OFF, se aplica sobre el devanado primario una tensión $V_{in}/2$. Esto induce una corriente en el lado secundario, en el devanado N_s una corriente que sale por el terminal * del devanado, circulando en el sentido de las agujas del reloj.

Lo que ello provoca es que el diodo D1 conduzca y el diodo D2 no, con lo cual la corriente pasa por el filtro LC, y llegando a la carga o la batería de la salida del convertidor.

La corriente por la bobina aumenta de la siguiente manera:

$$I_L = \frac{1}{L} \left(\frac{V_{in}}{2} \frac{N_s}{N_p} - V_o \right)$$

Siendo: I_L = Corriente que pasa por la bobina de salida

L = Valor (en H) de la bobina de salida

V_{in} = Tensión de entrada

$\frac{N_s}{N_p}$ = Relación de transformación entre el secundario y el primario

V_o = Tensión de salida

Cuando S2 está en modo ON y S1 en modo OFF, se aplicaría sobre el devanado primario una tensión $-V_{in}/2$, lo que induce una corriente en el secundario que entra por el terminal

* del devanado, haciendo que D2 conduzca y D1 no lo haga, pasando por el filtro LC y llegando a la carga o batería de forma continua. La corriente por la bobina aumenta de la misma manera que en el estado anterior.

Cuando ambos interruptores se encuentran en modo OFF, la corriente de la bobina sigue circulando por ambos diodos, lo que provoca que la tensión en cualquiera de los devanados del transformador sea nula, que la corriente de magnetización se mantenga constante y que la corriente de la bobina se vaya reduciendo según:

$$I_L = \frac{V_o}{L}$$

Siendo: I_L = Corriente que pasa por la bobina de salida

L = Valor (en H) de la bobina de salida

V_o = Tensión de salida

El ciclo de trabajo se rige por:

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \cdot \frac{N_p}{N_s}$$

Siendo: D = Ciclo de trabajo

V_o = Tensión de salida

V_{in} = Tensión de entrada

$\frac{N_p}{N_s}$ = Relación de transformación

En la siguiente ilustración se puede observar la tipología de un convertidor de Medio Puente o Half Bridge:

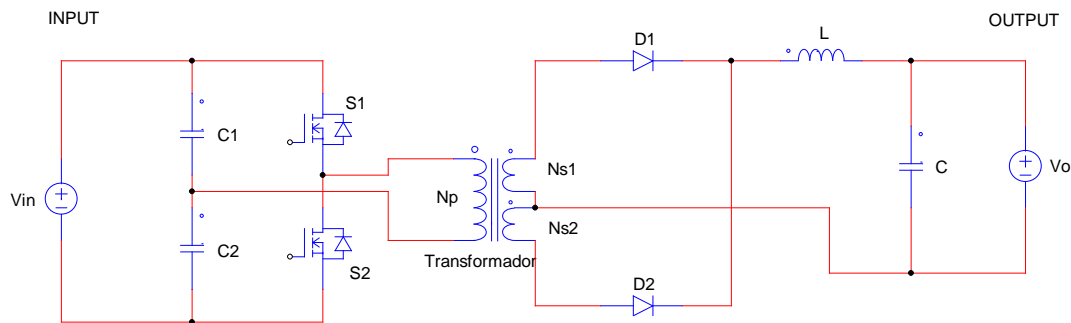


Ilustración 19: Convertidor Half-Bridge

CONVERTIDOR FULL-BRIDGE [4][7]:

Este tipo de convertidor es el que mayor potencia puede gestionar de todos los estudiados hasta ahora, que son los convertidores continua-continua. Puede llegar a gestionar potencias desde 50 W hasta 5 kW, aunque es muy común su uso en aplicaciones desde 1 kW hasta 3 kW, así que es el más indicado para implementar en el convertidor que se está estudiando en este Trabajo.

En este convertidor, el lado primario o de entrada del convertidor está formado por cuatro interruptores en una configuración llamada “totem pole” y normalmente se suele utilizar MOSFET, aunque bien es cierto que para aplicaciones que necesitan un alto nivel de potencia y/o de tensión, se suelen utilizar otro tipo de interruptores como los IGBT’s o algunos tipos de tiristores modernos. De estos cuatro interruptores, los dos que están colocados más abajo, y que se denominan S3 y S4, tienen sus puertas de contacto o gates referenciadas a tierra, mientras que los interruptores situados más arriba, denominados S1 y S2 no están referenciados de ningún modo a tierra, con lo que necesitan unos drivers más complejos. Para su estudio, se tiene que tener en cuenta que estos interruptores se accionan de dos en dos, nunca son accionados los cuatro al mismo tiempo, y la apertura y

cierre de los mismos se hace con la siguiente combinación: S1 y S4 se abren y cierran solidariamente, y S2 y S3 también lo hacen de la misma manera, con lo cual, las combinaciones posibles de apertura y cierre son:

S1	S2	S3	S4
ON	OFF	OFF	ON
OFF	ON	ON	OFF

Los dos pares de interruptores operan con los mismos tiempos de apertura y cierre en cada periodo, así que el convertidor trabaja con simetría en cada mitad de ciclo. Consecuentemente, en el lado primario del transformador, se podrán observar formas de onda de corriente alterna simétricas, lo que provoca que la corriente magnetizante tome valores negativos y positivos, utilizando así la totalidad de la curva característica B-H del transformador, es decir, se aprovecha al máximo el núcleo del transformador, lo que permite tener un transformador lo más ajustado posible para una potencia dada.

El convertidor Full-Bridge puede presentarse de dos modos distintos: con la bobina en serie a la salida del circuito, dando una alimentación de potencia basada en la tensión o Buck-type, o bien con la bobina en el lado primario o de entrada del convertidor en serie con la fuente de tensión, dando una alimentación de potencia basada en la corriente o Boost-type. Para el caso de estudio del presente Trabajo, se optará por un convertidor Full Bridge con la bobina en serie a la salida del mismo, con lo cual, sería un Buck-type, en el cual se centrará el estudio del Full Bridge.

Se puede observar en la siguiente ilustración la configuración Full Bridge:

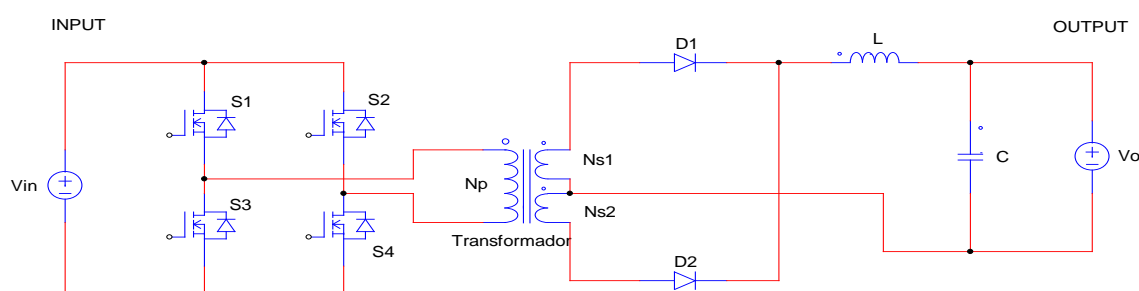


Ilustración 20: Convertidor tipo Full-Bridge

A continuación, se estudiará cómo varía la tensión y corriente a la salida del convertidor en las distintas etapas de funcionamiento del convertidor; cuando S1 y S4 se encuentran en modo ON o cerrados, y por el contrario S2 y S3 se encuentran en modo OFF o abiertos, la tensión que ve el primario del transformador es igual a la tensión de entrada del convertidor:

$$V_{N_p} = V_{in}$$

Siendo: V_{N_p} = Tensión en el devanado primario del transformador

V_{in} = Tensión de entrada del convertidor

Al tener el primario esa tensión, circula por el devanado una corriente en el sentido de las agujas del reloj, en el que entra por el lado * del devanado, la cual induce una corriente en el lado secundario del transformador denominado N_s1 que sale por el lado * del devanado.

En este caso, el diodo D1 conduce y el diodo D2 está bloqueado por lo que la corriente pasa por la bobina hacia la carga o la batería colocada a la salida del convertidor. En este caso la corriente que pasa por la bobina de salida es la siguiente:

$$I_L = \frac{1}{L} \left(V_{in} \cdot \frac{N_s}{N_p} - V_o \right)$$

Siendo: I_L = Corriente que pasa por la bobina de salida

L = Valor (en H) de la bobina de salida

V_{in} = Tensión de entrada

$\frac{N_s}{N_p}$ = Relación de transformación entre el secundario y el primario

V_o = Tensión de salida

Como se puede observar, la fórmula que permite conocer la corriente que pasa por la bobina, es prácticamente igual a la del convertidor Half Bridge, con la diferencia que en este caso, la tensión de entrada es la total, no la mitad de la misma, ya que al tener los cuatro interruptores, el devanado ve la totalidad de la tensión de entrada.

Cuando S2 y S3 se encuentran en modo ON, mientras que S1 y S4 están en modo OFF, la tensión que ve el primario del transformador es la misma que en el caso anterior pero con signo contrario, ya que ahora la corriente sale por el lado * del devanado y circula en el sentido contrario a las agujas del reloj, con lo cual:

$$V_{N_p} = -V_{in}$$

Siendo: V_{N_p} = Tensión en el devanado primario del transformador

V_{in} = Tensión de entrada del convertidor

Esta inversión en la tensión en el devanado primario, induce una corriente en el devanado secundario Ns2 que entra por el lado * de dicho devanado, circulando en el sentido contrario a las agujas del reloj, y permitiendo que el diodo D2 conduzca, mientras que el diodo D1 se encuentra bloqueado. De esta forma la corriente pasará por la bobina hacia la salida del convertidor. La corriente que pasa por dicha bobina es exactamente la misma que en el caso anterior.

En el estado de dead time o tiempo muerto en el que todos los interruptores se encuentran en modo OFF, ocurre algo muy similar a lo que ocurre en el convertidor Half Bridge, y es que la corriente almacenada en la bobina de salida, recircula por los dos diodos, saliendo por el lado * del devanado Ns1 y entrando por el lado * del devanado Ns2, lo que provoca que la tensión en cualquier devanado del transformador sea nula. En este caso la corriente de dicha bobina es:

$$I_L = \frac{V_o}{L}$$

Siendo: I_L = Corriente que pasa por la bobina de salida

L = Valor (en H) de la bobina de salida

V_o = Tensión de salida



Además, el ciclo de trabajo se calcula como:

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{N_p}{N_s}$$

Siendo: D = Ciclo de trabajo

V_o = Tensión de salida

V_{in} = Tensión de entrada

$\frac{N_p}{N_s}$ = Relación de transformación

PORQUÉ UN CONVERTIDOR FULL BRIDGE PHASE SHIFT.

La razón por la cual se ha elegido este tipo de convertidor es por su utilización en muchas aplicaciones similares a la que se está estudiando, en el que las potencias, tensiones y corrientes a manejar son elevadas. Como se ha podido observar en el apartado anterior, los convertidores sin aislamiento no pueden trabajar con potencias por encima del Kilowatio [4][7], y además, no tienen tanta seguridad entre la entrada y la salida como sí la tienen los convertidores aislados, y esto permite que sea compatible con la aproximación modular que se quiere utilizar.

Se debe tener en cuenta que en este caso, es imprescindible que la entrada (en este caso la red eléctrica, o la batería principal, según el modo en el que esté el vehículo) esté totalmente aislada de la salida (la batería principal o la batería auxiliar), ya que un fallo en cualquiera de los dos extremos, puede acarrear consecuencias irreparables en el extremo opuesto, dañando así al vehículo o a la instalación doméstica de electricidad. Así que, una vez descartados los convertidores sin aislamiento, el análisis se centra en los que sí lo poseen.

Se ha escogido el convertidor de puente completo con desplazamiento de fase ya que este convertidor puede trabajar con potencias por encima a los 3 kW. Si bien la potencia total



que se necesita para recarga la batería principal (que es la mayor demanda de potencia), no supera los 4 kW, se requiere que la potencia de cada módulo sea suficiente para gestionar toda la demanda de potencia durante la recarga de la batería. De este modo, se evita cualquier posible fallo en la gestión de la potencia. Además, la tensión tanto a la entrada como a la salida, requiere que sea un convertidor de este tipo, debido a sus altos valores.

Otra de las razones es el poco estrés que sufren los interruptores en este tipo de convertidores, ya que al trabajar los cuatro en conjunto y cada uno de ellos tiene un ciclo de trabajo de como máximo 0,5, esto hace que los interruptores trabajen con muy poco estrés en la conmutación.

Hay que tener en cuenta que están trabajando a 20 kHz, que no es un valor muy alto de frecuencia para la frecuencia a la cual pueden llegar a trabajar este tipo de interruptores, los MOSFET.

Además, la buena utilización del transformador, como ya se ha estudiado anteriormente, es otra de las principales razones por las cuales se ha escogido este tipo de convertidor, aunque la más importante de todas sea la potencia a la cual pueden trabajar estos convertidores.

POR QUÉ LA ASOCIACIÓN DE CONVERTIDORES COMO MÓDULOS

Se ha elegido una configuración modular de 4 módulos de convertidores, ya que lo que se busca es que el convertidor sea lo más flexible, económico y robusto posible. Los 4 módulos son idénticos entre sí (debiendo considerar las pequeñas variaciones debido a su construcción uno con respecto a otro), abaratando así el coste del conjunto del convertidor, ya que no es necesario un convertidor específico para este modelo de coche, sino que, utilizando convertidores más pequeños y más utilizados, se consigue el mismo fin, incluso mejorando la flexibilidad y la eficiencia del mismo.

Otra de las razones por las cuales se ha decidido emplear este tipo de configuración, es unificar los dos convertidores que actualmente necesita el modelo de Mitsubishi en los 4 módulos pequeños, de tal manera que se pueda prescindir de uno de los convertidores que



necesitaba el coche eléctrico anteriormente, integrando sus funciones en un único convertidor.

Esto se consigue mediante el cambio en el número de módulos que trabajan en cada momento y con las correspondientes conexiones entre la red, la batería principal y la batería auxiliar de 12 V. Con esto conseguiremos controlar todas las funciones de recarga de ambas baterías desde un único control integrado en el propio convertidor, y no dependerá de alguna centralita electrónica del vehículo.

La agrupación tanto de convertidores, como de otros elementos electrónicos y eléctricos, en módulos más asequibles, manejables y fiables, es una tendencia que se está implantando en la industria. Con el gran avance en tecnología en los últimos años, se puede conseguir abaratar los costes asociados.

Además de todo esto, está demostrado que un convertidor de este tipo, en el que los módulos se reparten el trabajo de forma equitativa, es mucho más eficiente que un convertidor único, ya que todos sus componentes tienen menor estrés térmico y eléctrico, y además no necesitan estar preparados para manejar grandes magnitudes ni de tensión, ni de corriente, y en consecuencia, de potencia. Se pretende alcanzar valores del 98% de eficiencia utilizando convertidores modulares, para aplicaciones de hasta 3,3 kW, como se puede observar en el artículo [5].

Es por ello por lo que usando esta tecnología, se consigue alcanzar uno de los objetivos, y el principal del Trabajo, que es realizar un convertidor más eficiente a partir de módulos pequeños.

Telecom Rectifier Employing Series Multi-Cell Approach

■ Specifications

Input Voltage	230 V _{rms} (180 V _{rms} - 270 V _{rms})
Nominal Output Voltage	48 V _{DC}
Output Voltage Range	40-60 V _{DC}
Rated Power	3.3 kW
Target Efficiency	98.5%
Target Power Density	3 kW/dm ³
Hold-Up Time	10ms at Rated Power
Switching Frequency	≥20 kHz (per Module)
EMI Standard	CISPR Class A and Class B

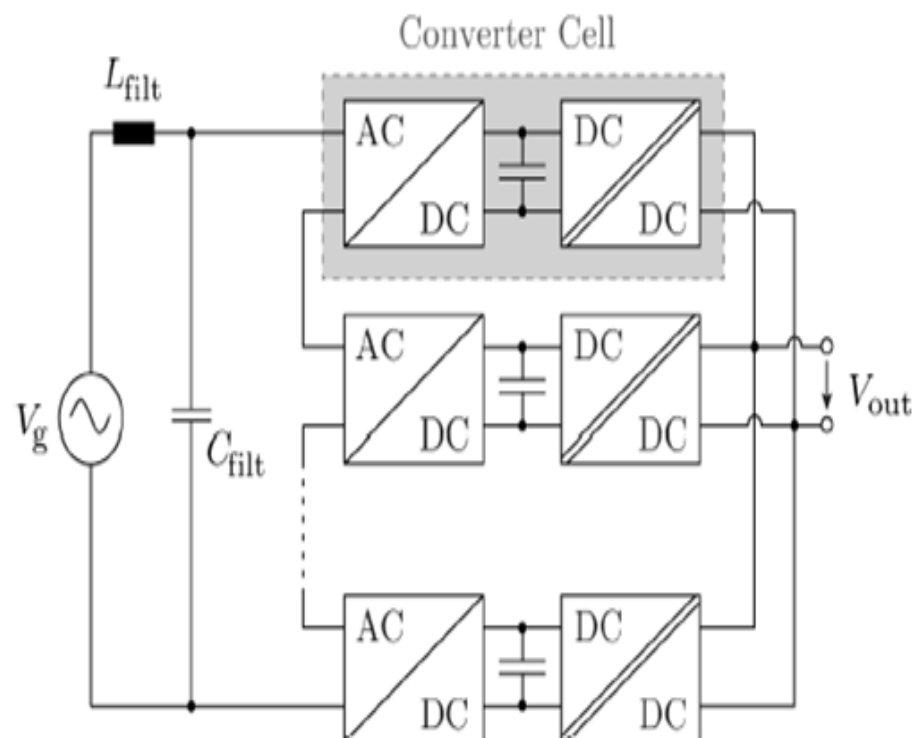


Ilustración 21: Extracto de [5] en el que un convertidor modular de una potencia similar a la del convertidor realizado, llega a una eficiencia del 98%



VENTAJAS DE SU USO

Como ya se ha expuesto anteriormente, las grandes ventajas del uso de un convertidor modular es la gran flexibilidad que presenta, la eficiencia más alta conseguida, y el abaratamiento de los costes. La flexibilidad que aporta poder controlar cada módulo para que realice un trabajo específico y concreto en cada instante de tiempo es muy positivo para cualquier aplicación, ya que permite que una misma unidad, en este caso de convertidores, pueda realizar diversas tareas por sí mismo, consiguiendo además, que los componentes no sufran un gran estrés eléctrico, ya que cada módulo gestionará menor tensión y corriente, y en consecuencia un menor desgaste por estrés térmico.

Como se puede observar en el artículo [5], con este tipo de configuraciones se consigue llegar a cotas de eficiencia muy elevadas. Y es que, al ser los módulos de conversión mucho más pequeños y menos específicos para cada aplicación, permite que los interruptores sean de menor tensión y presenten menores pérdidas de conmutación, los transformadores sean más ajustados, y al tener una utilización de toda la curva B-H, el núcleo se aproveche bastante bien, y en consecuencia, el rendimiento sea mejor y que los componentes (condensador a la entrada, diodos, filtro LC de salida) sean más ajustados y sufran menor estrés térmico y eléctrico, especialmente si se desfasa el funcionamiento de los convertidores a nivel de conmutación (interleaving).

Además de todo esto, el menor coste de un convertidor pequeño, que será un módulo cuando se integre con los otros en un mismo convertidor, permite que al realizar un gran número de convertidores modulares. El coste por cada módulo será menor, y el coste total de fabricación puede bajar, en comparación con la realización de un único módulo específico.



INCONVENIENTES DE SU USO

El mayor inconveniente del uso de convertidores modulares, es el control que hay que realizar para integrar varios módulos iguales, para que todos ellos trabajen en una misma dirección y el reparto de tensiones, corrientes y potencias sea uniforme. Si bien es cierto que los módulos son idénticos entre sí, también es cierto que en la fabricación de los mismos, es muy poco probable que sus componentes no sufran pequeñas variaciones, lo que hace que aunque las características de cada módulo sean prácticamente iguales, no lo son así los componentes.

Esto entraña un gran reto, que es conseguir que aunque haya mínimas diferencias entre ellos, se consiga que con un buen control, trabajen todos al unísono como si de un único convertidor se tratara. Es por ello por lo que, a la hora de hacer trabajar a los módulos a la vez, se debe de tener especial cuidado en el control a emplear. Es con toda seguridad la parte más difícil y el mayor inconveniente, ya que para la fabricación en serie del vehículo, se necesita tener un control estándar que permita trabajar con alta eficiencia, a todos y cada uno de los convertidores modulares.

Otro posible inconveniente, aunque es más bien otro reto, es realizar con mucho cuidado una buena desconexión y conexión de módulos, para buscar la flexibilidad que se comentaba más arriba. Se ha de ser muy cauteloso a la hora de realizar la conexión y desconexión de módulos, ya que cada aplicación requerirá un número determinado de módulos en funcionamiento. En nuestro caso, son dos las únicas posibilidades de funcionamiento, como se podrá ver en el apartado 5, o bien el funcionamiento de los cuatro módulos a la vez, o bien únicamente uno de ellos. Se debe de realizar una buena gestión mediante el control de relés o de algún otro automatismo, para que el cambio sea lo más rápido y preciso posible.

PARAMETRIZACIÓN DEL CONVERTIDOR

CONEXIÓN DE LOS MÓDULOS ENTRE SÍ A LA ENTRADA Y A LA SALIDA.

Como ya se ha comentado anteriormente, el convertidor que se está estudiando, estará compuesto por cuatro módulos pequeños de convertidores de continua-continua del tipo Full Bridge. A la hora de realizar la conexión, se ha optado por la siguiente configuración:

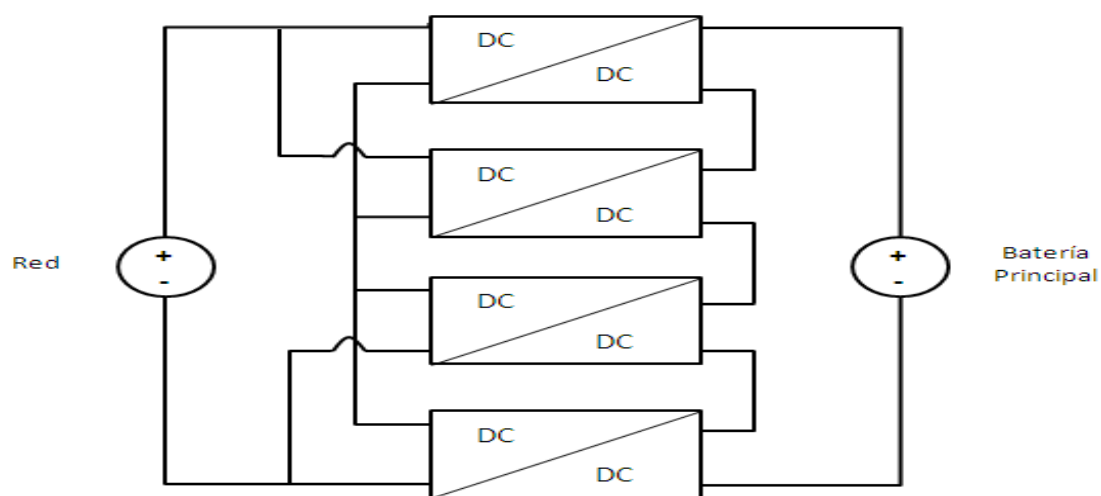


Ilustración 22: Esquema del convertidor modular.

Para la entrada de los módulos, se ha escogido una configuración paralelo en serie con paralelo, esto quiere decir que los dos primeros módulos estarán conectados en paralelo entre sí, al igual que los módulos 3 y 4, y entre estos dos bloques de dos módulos, la conexión será en serie. Se ha elegido este tipo de configuración para que cada uno de los módulos tenga que gestionar una tensión y corriente no muy grandes. Si se hubiera elegido una configuración en serie entre los cuatro módulos, cada módulo debería de soportar, para que sea el sistema fiable, 1.200 V, lo que supondría unos interruptores más grandes, de distinto tipo (deberían ser IGBT en vez de MOSFET como se ha empleado), aumentando considerablemente el coste de cada módulo, y lo que es más importante, disminuyendo la eficiencia de cada módulo, ya que al ser necesarios interruptores que puedan cortar mayor tensión, tienen más pérdidas de conmutación frente a otros que sean más pequeños.



Además de la razón descrita con anterioridad, se ha elegido esta configuración pensando en las dos posiciones que debe adoptar el convertidor en conjunto. Se ha de recordar que el convertidor debe cargar la batería principal de 330 V del coche, desde la red, y a su vez, debe cargar la batería auxiliar de 12 V desde la batería principal.

Como se puede observar, el nivel de tensión de la batería principal, y el nivel de tensión que tiene cada módulo con este tipo de configuración (300 V), es muy similar, con lo cual, al realizar la conexión necesaria para cargar la batería auxiliar, el módulo encargado de realizar esta función no tendrá que soportar un gran cambio en el valor de tensión de entrada, lo cual permite que el módulo trabaje sin problemas, y sin verse infrutilizado.

Además, eligiendo la configuración paralelo-serie-paralelo, aseguramos que la corriente de entrada de cada módulo no sea demasiado grande, para que así sus componentes no deban soportar una gran cantidad de corriente y sufran por estrés eléctrico y térmico.

Para la salida de los módulos, se ha elegido una configuración en serie para asegurar que cada módulo entrega la misma corriente, y que esta corriente individual de cada módulo es exactamente la misma que la corriente total de salida del conjunto del convertidor. Con esto se consigue que una vez los módulos estén conectados conjuntamente, el control de la corriente de salida, que será el reto más complicado, se realice de un modo más sencillo.

Si bien es cierto que los componentes de la salida de cada módulo deberán de soportar una tensión algo mayor que a la entrada, y que la corriente también tendrá valores superiores, el problema no es tan grande como en el caso de la entrada, ya que en la salida del convertidor no se encuentra ningún interruptor, solamente diodos, que son mucho más robustos y fiables que los interruptores, y que no sufren tanto estrés eléctrico ni térmico como éstos.



CÁLCULO DE MAGNITUDES DE LOS MÓDULOS

PARÁMETROS GENERALES DEL CONVERTIDOR:

A continuación se detallan los valores nominales de potencia, tensión y corriente que el convertidor debe gestionar:

Potencia del convertidor:	3,3 kW
Tensión de entrada:	600/330* Vdc
Tensión de salida:	330/82* Vdc
Corriente de entrada:	5,5 A
Corriente de salida:	10/5* A
Frecuencia de conmutación:	20 kHz
Ciclo de trabajo:	0,3
Potencia por módulo:	825 W
Tensión de entrada por módulo:	300/330* Vdc
Tensión de salida por módulo:	82/14* Vdc
Corriente de entrada por módulo:	2,75 A
Corriente de salida por módulo:	10/5* A

* Valores con la reconfiguración de un módulo para la recarga de la batería auxiliar de 12 V desde la batería principal de 330 V.

MAGNITUDES DE LOS COMPONENTES DE CADA MÓDULO:

Los siguientes datos y valores corresponden a los componentes de cada módulo, para su fabricación e implantación.

Son valores que se han estimado en base a convertidores tipo Full Bridge ya empleados para otro tipo de aplicaciones que requerían unos niveles de tensión y corriente similares a los niveles a los que debe trabajar cada módulo [6].

Interruptores utilizados:	Tipo MOSFET
Condensador de entrada:	750 μ F
Condensador de salida:	50 μ F
Bobina de salida:	50 μ H
Relación de transformación:	2:1
Inductancia magnetizante:	500 μ H
Resistencia de salida de cada módulo:	0,01 Ω

Se han empleado estos valores, estimándolos a partir de la experiencia de la utilización de este tipo de convertidores en aplicaciones de similar potencia, tensión y corriente. Además, una vez simulados, como se podrá comprobar, son unos valores idóneos para dar los valores nominales de tensión y corriente.



USO DE UN ÚNICO CONVERTIDOR POR MÓDULOS PARA CARGA DE BATERÍA PRINCIPAL

REALIZACIÓN DE UN CONVERTIDOR MODULAR, A PARTIR DE CONVERTIDORES PEQUEÑOS

Para la recarga de la batería principal de 330 V es necesaria una red (que actuará como fuente de tensión) de 230 Vef, o lo que es lo mismo 325 Vpico como la que se puede encontrar en cualquier domicilio, con una corriente máxima de 10A. Para la recarga rápida de la batería se puede adquirir un cargador rápido que proporciona una tensión de 400 Vef, lo que se traduce en 565 Vpico, que el convertidor a estudiar debe de soportar y convertir en 330V. Antes de que el convertidor que se está estudiando entre en funcionamiento, dicha tensión pasa por un rectificador elevador (no entra dentro del estudio de este Trabajo) que consigue mantener la tensión de entrada en 600 V de corriente continua. Una vez la tensión está en 600 V de corriente continua, entraría en funcionamiento el convertidor a estudiar que debe convertir esos 600 V de corriente continua a 330 V de corriente continua, que es la tensión a la que debe trabajar la batería principal (el fabricante así lo indica), con lo cual el mismo ha de ser DC-DC convirtiendo la tensión de 600 a 330 V, con una potencia mínima de 3,3 kW.

Después del análisis de los convertidores existentes posibles para este tipo de configuración, detallado en el apartado 3 del presente Trabajo, finalmente se ha optado por un Convertidor DC-DC de puente completo con desplazamiento de fase (Full Bridge Phase Shift Converter). El motivo es la fiabilidad y robustez del mismo, ya que puede soportar potencias de más de 1 kW, algo necesario en este caso. Conjugando los 4 módulos, es posible utilizar el número de ellos que interese en cada caso, detallándose en la siguiente tabla el funcionamiento de cada módulo:

Objetivo	Potencia demandada	Nº módulos necesarios
Carga de la batería Principal desde la Red	3,3 kW	4
Carga de la batería de 12 V desde la batería Principal	48 W	1



Como se puede observar, mientras que para la recarga de la batería principal, de mayor potencia y capacidad, es necesario utilizar la totalidad de los módulos, trabajando el convertidor a plena potencia, una vez que la batería está totalmente cargada, o el coche está en funcionamiento y no tenemos la fuente de tensión de 230 V de la red doméstica, o del cargador rápido, la batería principal del vehículo es la encargada de la recarga la batería de 12 V auxiliar como la que tienen todos los vehículos para el arranque y alimentación de todos los componentes eléctricos y electrónicos del vehículo.

Para la recarga de ésta batería, mucho más pequeña que la de 330 V, y por lo tanto con una potencia y una demanda de energía mucho menor, no son necesarios los 4 módulos, con lo cual, por medio de relés y conexiones que se detallarán en el apartado 6, se consigue que en vez de ser el alternador el que recargue la batería de 12 V (como así ocurre en coches con motores térmicos), sea la batería principal la que haga esas funciones de recarga, utilizando únicamente uno de los 4 módulos, aprovechando así la citada flexibilidad del Convertidor estudiado.

Para poder llegar a este objetivo, se debe construir el convertidor modular siguiendo los siguientes pasos:

- Es necesario comprobar el tipo de convertidor que se va a necesitar. Como está detallado en el apartado 4, se ha elegido una configuración de paralelo-serie-paralelo en la entrada del convertidor y serie en los cuatro módulos en la salida del mismo. Una vez elegida la configuración, debemos de calcular la tensión y la corriente que debe soportar cada uno:
- Para la entrada es necesario soportar una tensión de 600 V, y una corriente máxima no superior a 6 A en conjunto, siendo la tensión nominal de cada módulo de 300 V y la corriente de 3 A.
- Para la salida, el conjunto ha de soportar 330 V y 10 A, siendo los máximos permitidos 350 V y 12 A. Con la configuración en serie, basta con que cada módulo pueda soportar 87,5 V y los mismos 12 A, valores que un convertidor de tipo puente completo con desplazamiento de fase puede soportar sin ningún problema.



Una vez comprobadas las especificaciones de cada módulo, debemos comprobar, con uno sólo, que los valores de entrada y salida del mismo son correctas. Para ello se realiza una simulación con el programa PSIM con un escenario en el cual la tensión de entrada sean 300 V y la de salida 82 V, que será la tensión nominal a la cual deba trabajar un solo módulo – visualización del módulo en la ilustración 23-. En cuanto a la corriente, ya que la potencia de entrada y de salida ha de ser la misma, el valor medio de la misma a la entrada ha de ser 1 A y la de salida 10 A, ya que debemos tener en cuenta que este módulo irá conectado a otros 3, a la entrada en paralelo con otro y en serie con el paralelo de los dos restantes, mientras que a la salida del mismo estarán todos en serie, y se busca una corriente de salida de 10 A, para que la potencia sea de 3,3 kW. Esto se consigue gracias a la parametrización del ciclo de trabajo y al control de la apertura y cierre de los interruptores, que por el momento serán unas fuentes de tensión de onda cuadrada, siendo en la primera rama de interruptores (1 y 3, siendo la fuente VSQ1) el desfase igual a 0° y en la segunda rama de interruptores (2 y 4, siendo la fuente VSQ2) el desfase igual a 150° .

En la ilustración 23, se puede observar el módulo descrito, además de poder observar en las ilustraciones 24 y 25 su simulación.

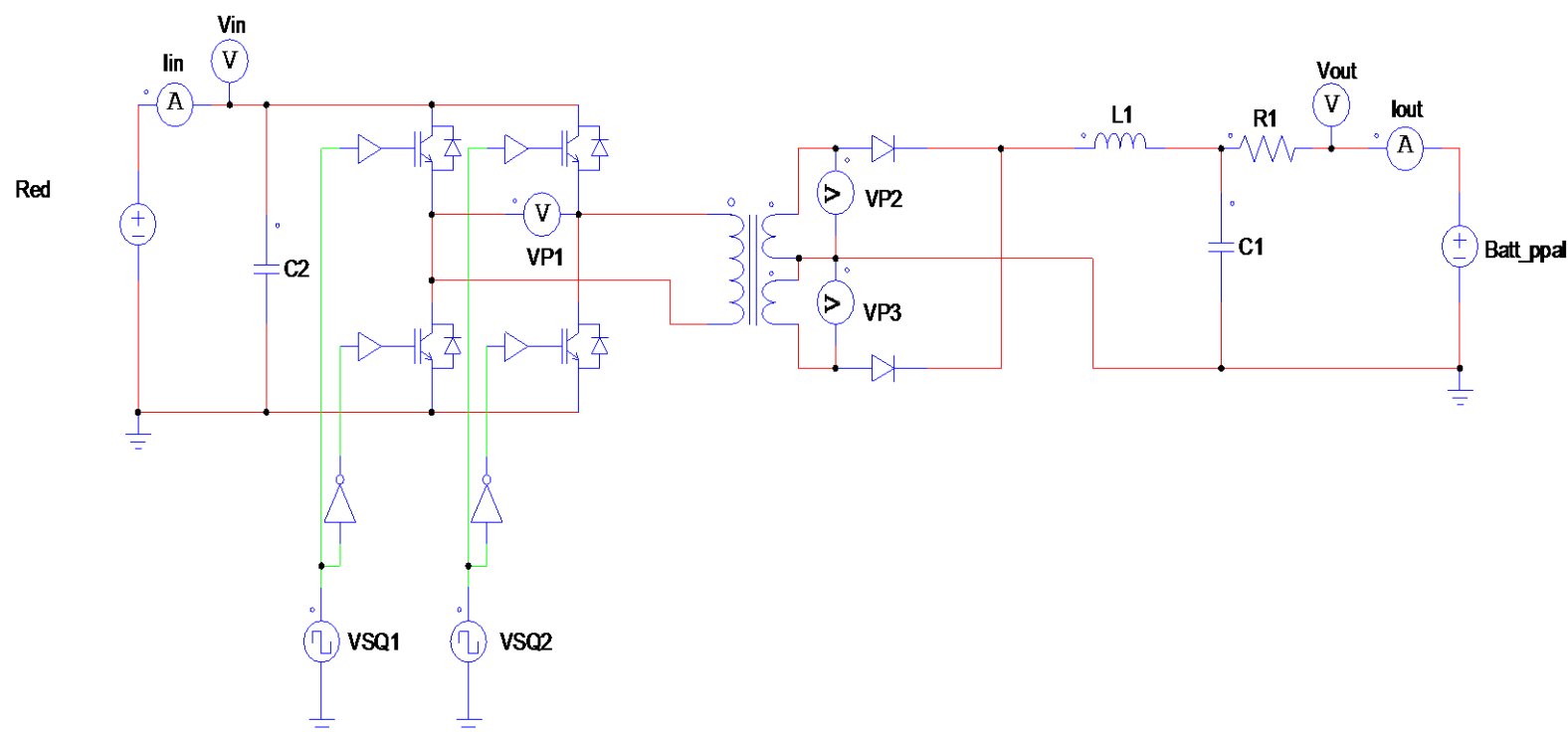


Ilustración 23: Módulo único de convertidor tipo Full Bridge Phase Shift

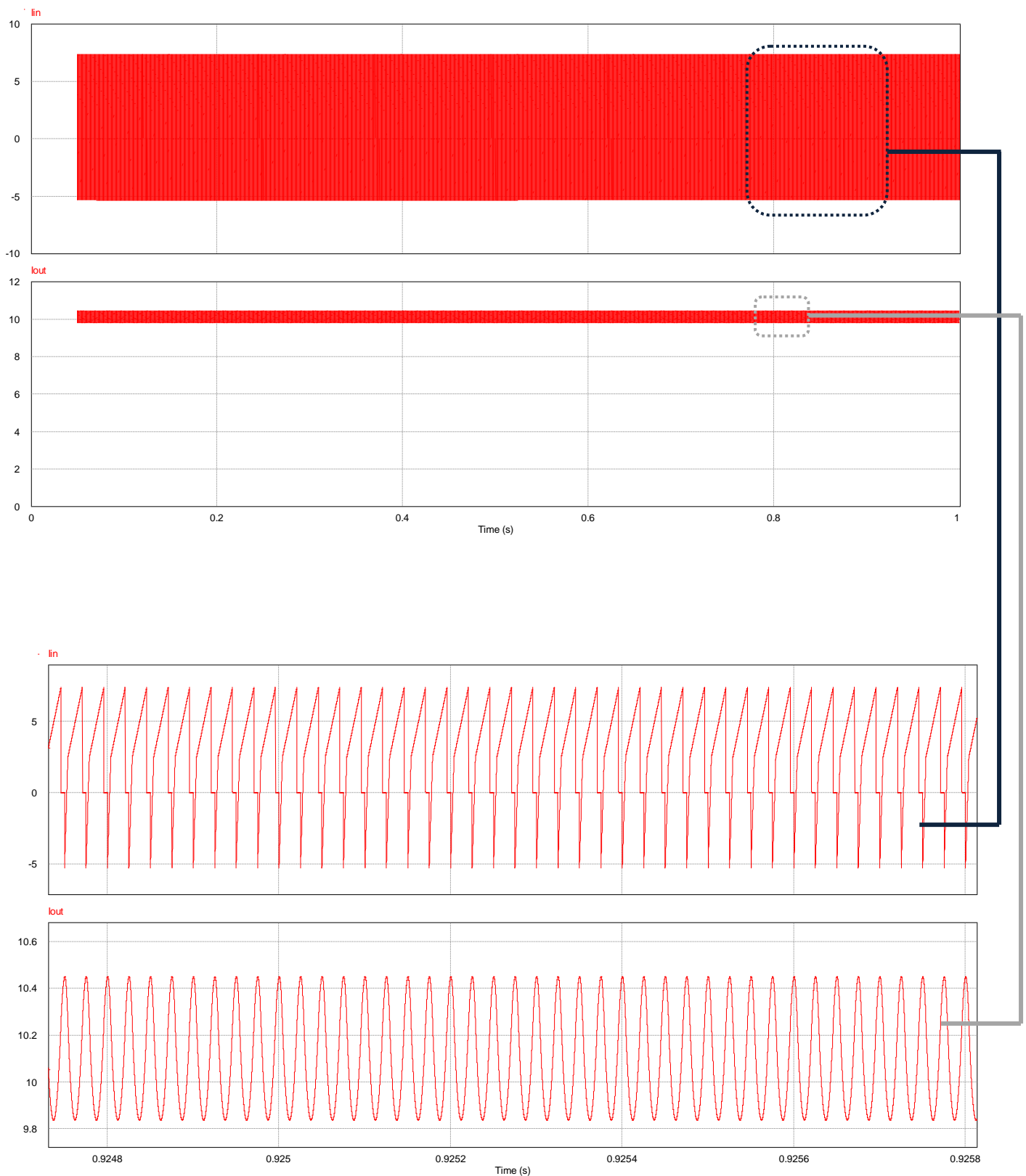


Ilustración 24: Simulación de la corriente de un único módulo

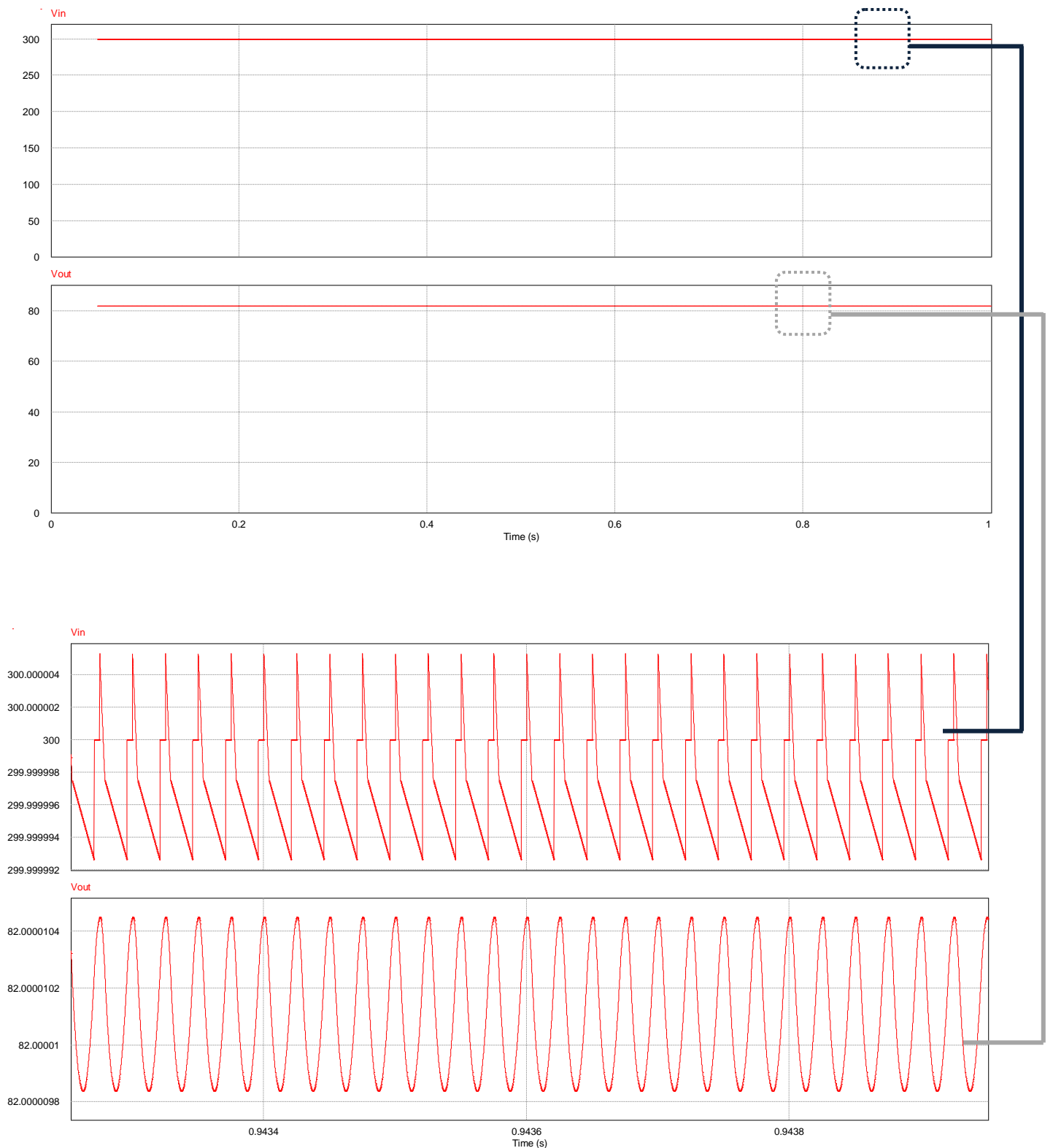


Ilustración 25: Simulación de la tensión de un único módulo del Convertidor



Como se puede observar en la ilustración 24, la corriente de entrada en valor medio no supera los 3 A, con un gran rizado, debido a que la corriente vista, está aún sin pasar por el filtro del condensador de entrada, mientras que a la salida, sin el correspondiente control del convertidor, que se estudiará en el apartado siguiente, la corriente es muy estable y prácticamente continua en torno a los 10 A que se requieren a la salida.

Por su parte, la tensión en la entrada, procedente del convertidor elevador que se intercala entre el convertidor a estudiar y la red, es totalmente continua en 600 V, mientras que la tensión de salida, es totalmente continua también en torno a los 82 V. Con lo cual, como se puede apreciar en la ilustración 25, el convertidor con los parámetros estudiados en el apartado 4, funciona correctamente.

Ya comprobado el funcionamiento, se debe conectar tal y como se ha descrito otros 3 módulos, de forma que la tensión de entrada a los 4 módulos sean los 600 V (300 V para cada módulo) ya citados y la salida sean 330 V, y la corriente de salida se estabilice en 10 A para la carga de la batería principal.

Para ello, primero colocaremos 3 módulos más, exactamente iguales al ya simulado, sin ningún tipo de control en lazo cerrado o en lazo abierto, haciendo que la apertura y cierre de los interruptores MOSFET de los módulos sean ordenados por unas fuentes de tensión de onda cuadrada, tanto en los MOSFET de la primera rama (1 y 3, con la fuente de tensión VSQ1) como en los de la segunda rama (2 y 4, con la fuente de tensión VSQ2), éstos últimos con un desfase de 150 grados frente a la primera rama, para que los MOSFET nos puedan dar una señal cuadrada, con el ciclo de trabajo perfecto para que a la salida se puedan obtener los 10 A y los 330 V requeridos.

En la siguiente ilustración se podrá observar cómo se han añadido los otros 3 módulos exactamente iguales, y más abajo su simulación en PSIM:

Estudio, diseño e implementación de un convertidor de potencia para coche eléctrico

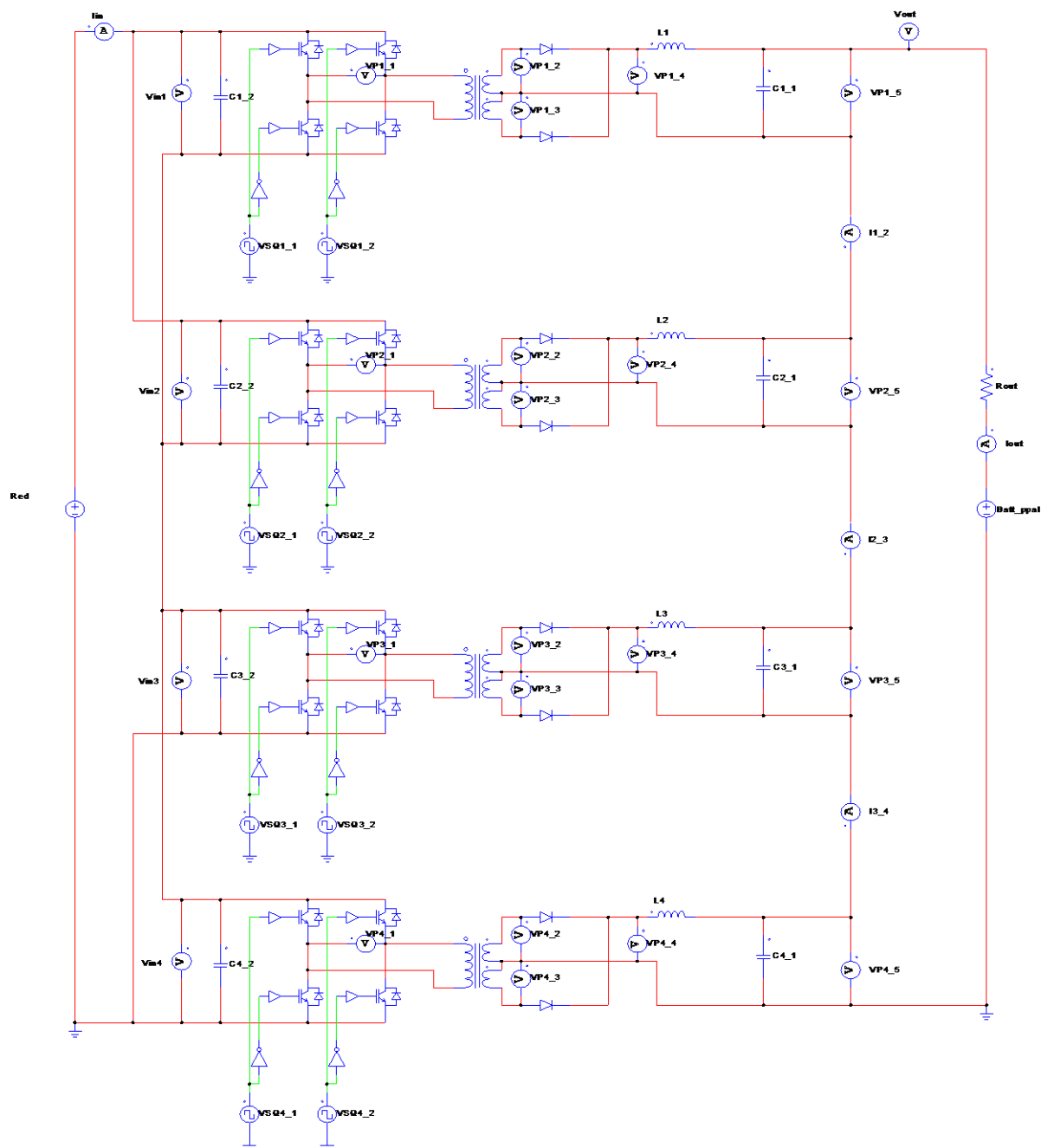


Ilustración 26: Convertidor de 4 módulos sin control

Se puede observar la forma de conexión descrita en el apartado 4, con las entradas de los módulos conectadas en paralelo-serie-paralelo, y las salidas de los mismos conectadas todas en serie, con el fin de minimizar la tensión a la salida de cada módulo. Una vez están los módulos acoplados, se simula con PSIM esta configuración, y los resultados son:

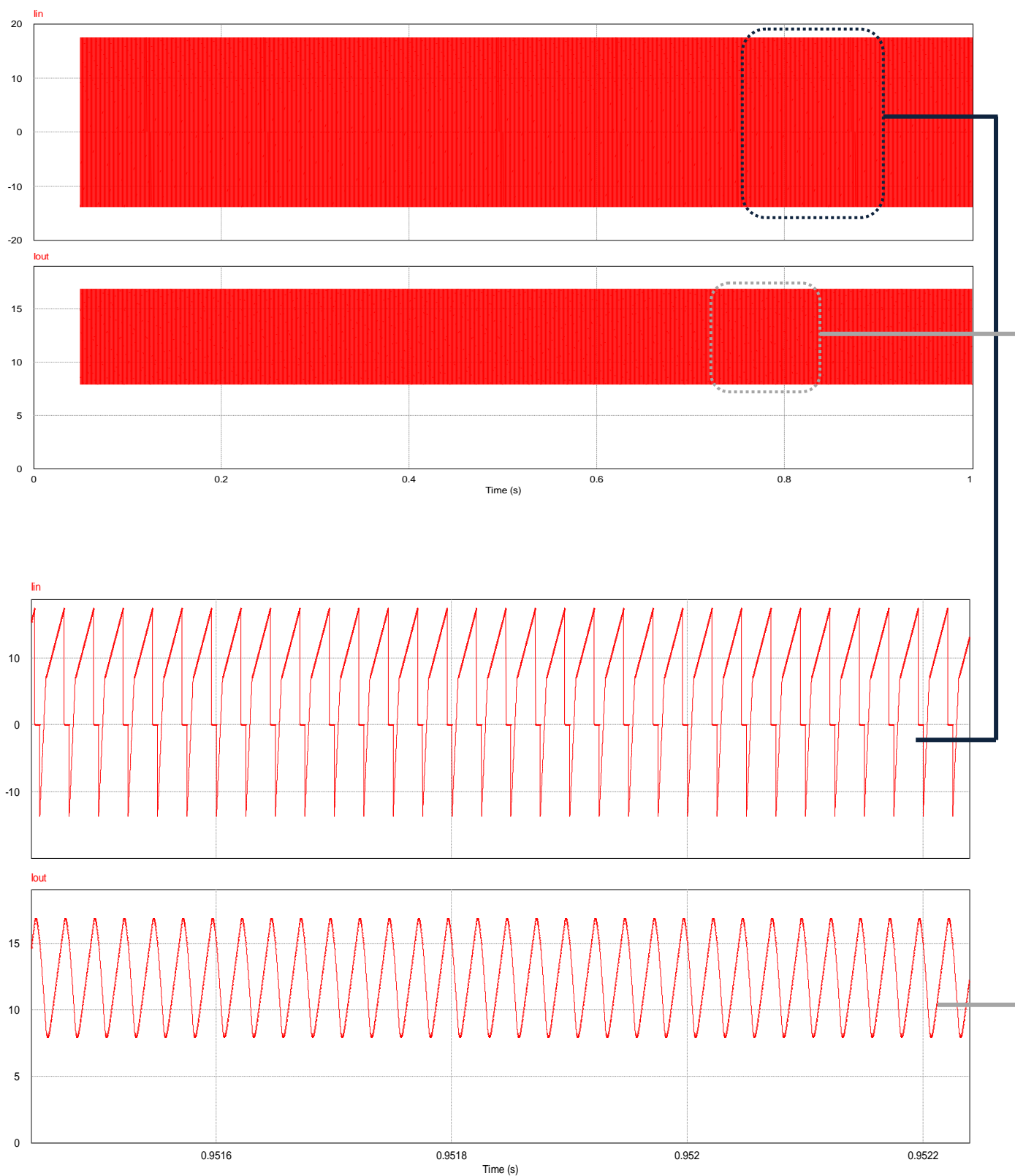


Ilustración 27: Simulación de la corriente entrante y saliente

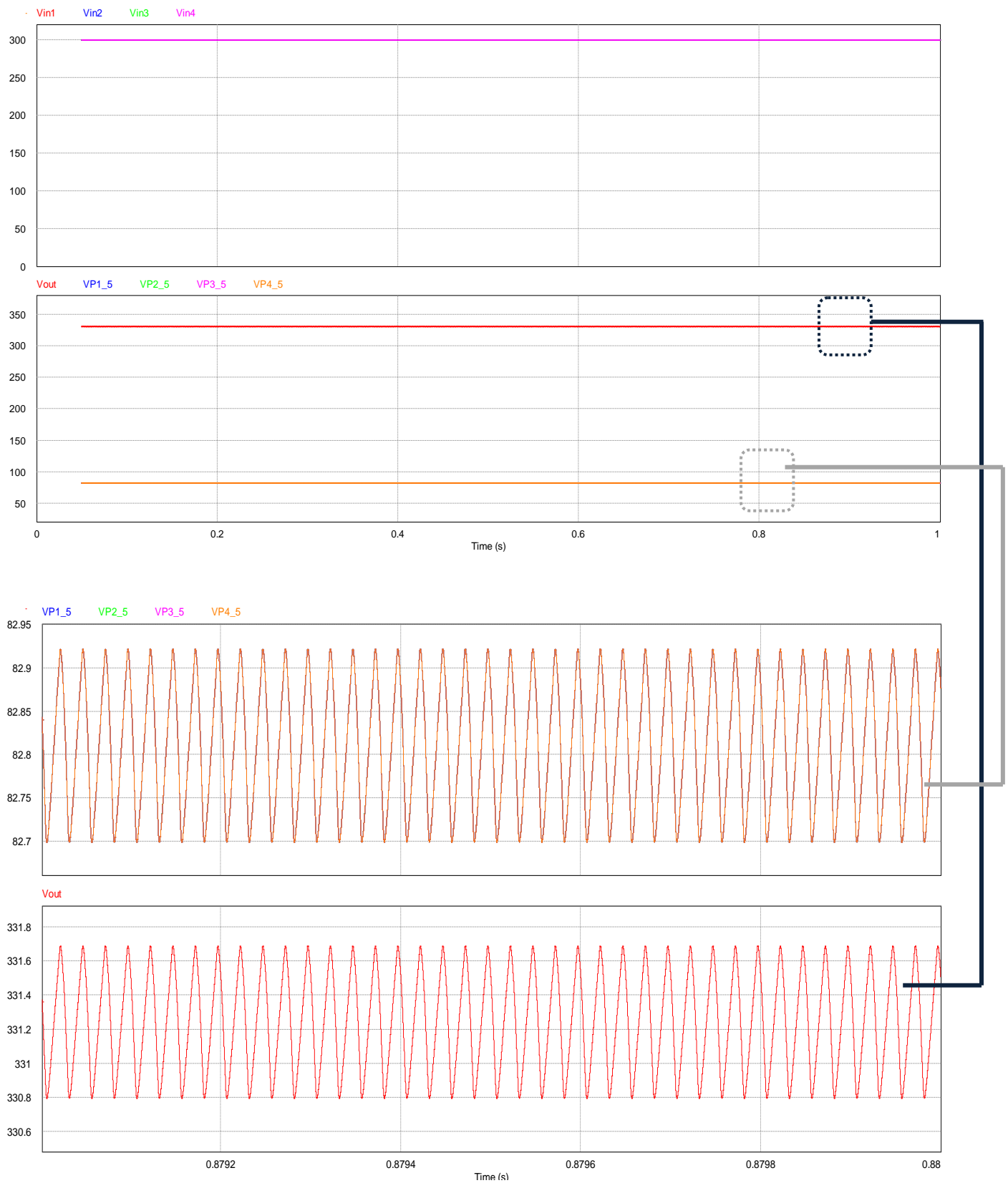


Ilustración 28: Simulación de la tensión saliente total y por módulos



Como se puede observar, sin ningún tipo de control aplicado en lazo cerrado al convertidor de 4 módulos, tanto la corriente como la tensión se encuentran en torno a los valores requeridos para el correcto funcionamiento del convertidor.

En el caso de la corriente, se observa que a la entrada del convertidor, ésta es muy pequeña en su valor medio (de aproximadamente 3 A), sin embargo su rizado es muy grande, de aproximadamente 15 A, algo que no es deseable ni aceptable. En cuanto a la corriente de salida, ésta oscila entre 8 y 17 A, siendo el valor medio algo superior a los 10 A, sin embargo, no es algo preocupante ya que como se indicaba anteriormente, estos datos pertenecen al convertidor sin control en lazo cerrado de corriente. Como se observa de nuevo, el rizado de la corriente de salida, al igual que el de la entrada, es muy grande e inaceptable en un convertidor de corriente continua a la entrada y a la salida.

En cuanto a la tensión del convertidor, a la entrada no hay ninguna perturbación de ningún elemento, así que se tienen 300 V de corriente continua en los módulos, lo que se debe observar es a la salida del convertidor. Se ha detallado en la Ilustración 28 por un lado la tensión total que da el convertidor, que es muy próxima a los 330 V requeridos y con muy poco rizado, lo cual es muy bueno tratándose de un convertidor modular sin control, y por otro lado la tensión que da cada uno de los 4 módulos, que al ser exactamente iguales, debería ser la misma, con el mismo rizado, ya que los 4 módulos son idénticos, y sus señales de apertura y cierre de sus interruptores MOSFET también lo son. Se observa que la tensión que da cada uno, es muy parecida a la requerida (82 V), aunque es algo superior, sin embargo su rizado es muy pequeño, no llega a 1 V, lo cual es bastante bueno, ya que a la hora de controlar estas señales, será más sencillo. Ya se ha visto el funcionamiento de los 4 módulos trabajando conjuntamente, pero se ha podido ver que el comportamiento no es idóneo y para que sea así, se debe de realizar un control sobre el convertidor, que permita que la tensión y la corriente tanto de salida como de entrada, tengan unos valores lo más continuos y estables posibles, para garantizar que el funcionamiento es satisfactorio. En el siguiente apartado se estudiarán dos tipos de control del convertidor que se estudia en este Trabajo.



CONTROL DEL CONVERTIDOR

Para controlar el convertidor modular que nos ocupa, se ha de hacer un lazo cerrado de control, es decir, un control que mida parámetros a la salida del convertidor, y en base a esas medidas, corrija el ciclo de trabajo de los interruptores de entrada, para así llegar a un punto donde el convertidor trabaje de forma satisfactoria.

Para el control se han estudiado varias posibles configuraciones, detalladas a continuación:

CONTROL DE LA CORRIENTE DE SALIDA TOTAL, CON LA MISMA SEÑAL DE CONSIGNA PARA LA ENTRADA DE TODOS LOS MÓDULOS

Una vez se tienen los 4 módulos exactamente iguales trabajando en conjunto, se ha realizado lo siguiente:

Como se puede observar en la ilustración 30, se toma con un sensor de corriente, la salida total de los módulos, que nos dará una medida de la corriente exacta durante el tiempo de simulación. Esa corriente, se lleva a un sumador, el cual tiene dos entradas, una positiva, y otra negativa.

Se introduce la señal de salida en el lado negativo, mientras que en el lado positivo, se introducirá una señal de corriente continua de 10 A, para así comparar el error que hay entre la referencia de 10 A y la corriente real de salida del convertidor.

Una vez que se ha comparado, ya se tiene aislado el error que hay entre la salida del convertidor y la referencia de 10 A, se hace pasar esa señal por un integrador, y más tarde por un limitador que no dejará que la señal, que en este caso es el ciclo de trabajo, sea superior a 0,45 (cabe recordar que el convertidor tipo Full Bridge no puede en ningún caso trabajar con un ciclo de trabajo superior a 0,5) y una vez tenemos la señal del ciclo de trabajo, se compara mediante un comparador con una señal triangular de la misma frecuencia que la

de conmutación de los interruptores, para dar así el pulso de señal cuando corresponde.

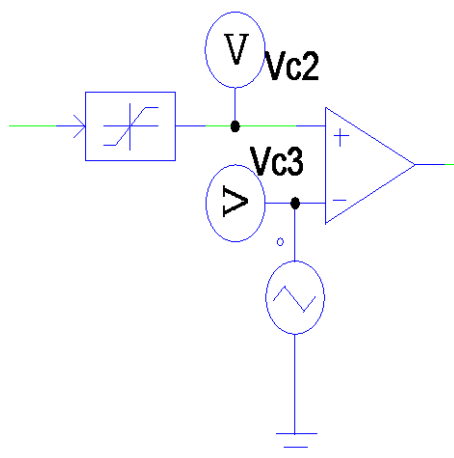


Ilustración 29: Detalle del modulador del lazo de control

Como se observa en la imagen 29, se hace pasar esa comparación donde en el lado positivo se inserta la señal que viene del integrador y el limitador, y en la negativa la de la señal triangular, y una vez conseguido este paso, se hará pasar a la señal resultante por un monoestable, en el cual interesa que éste envíe la señal correspondiente cuando hay un flanco de bajada de la señal.

Una vez se ha conseguido esto, esa señal se enviará a todos los interruptores 2 y 4, o de la segunda rama de cada módulo, corrigiendo así su ancho de pulso, es decir, el ciclo de trabajo, y modificando así la salida de corriente del convertidor.

En las siguientes ilustraciones (30 y 31) se puede observar cómo se ha implantado el lazo de control cerrado básico que se ha tratado en este apartado

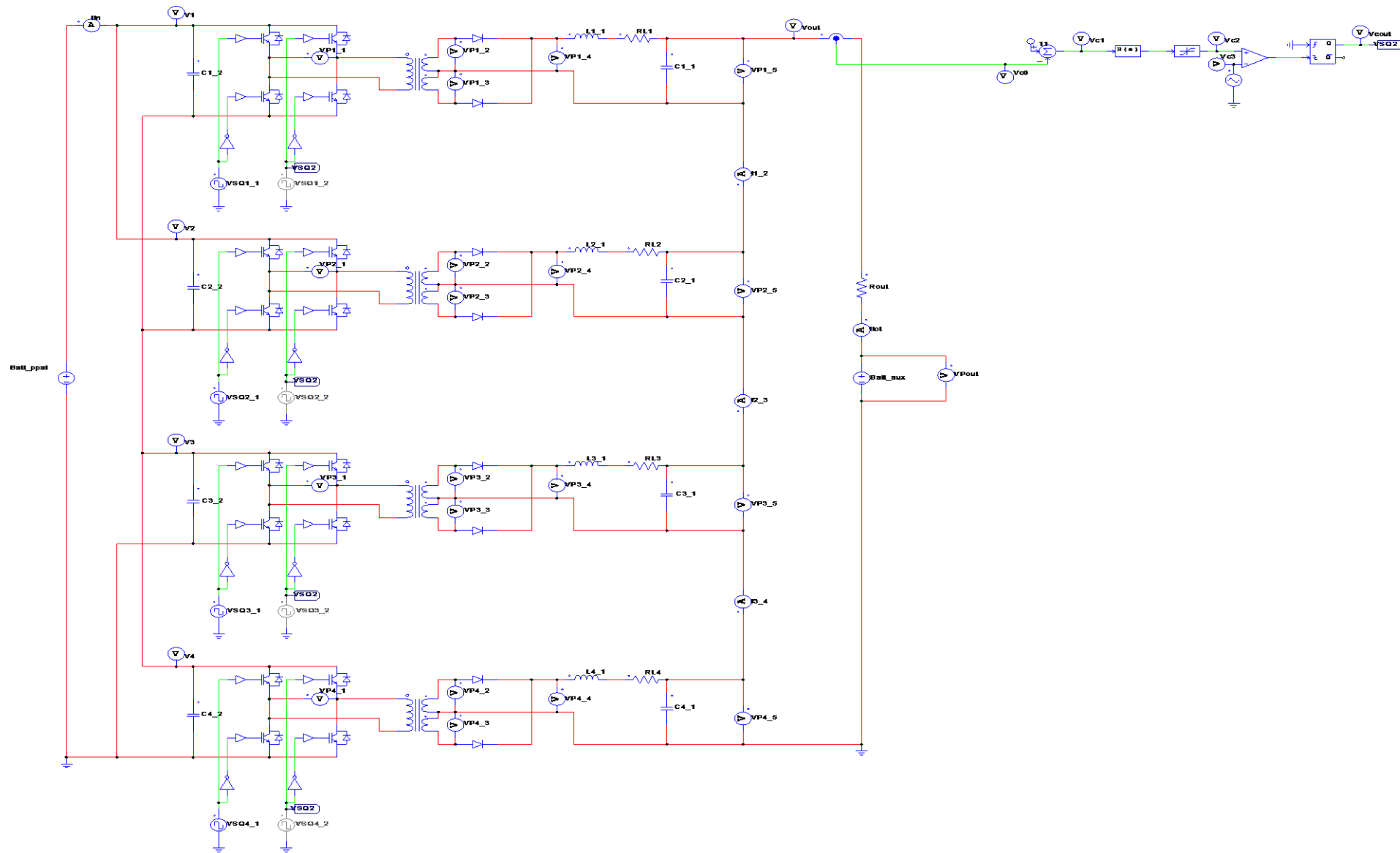


Ilustración 30: Convertidor modular con control en lazo cerrado de corriente tota

Estudio, diseño e implementación de un convertidor de potencia para coche eléctrico

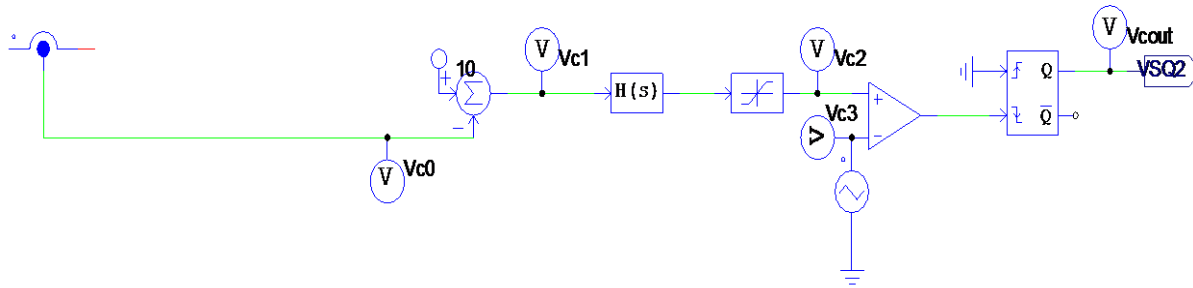


Ilustración 31: Detalle del control realizado

En el momento de simular este tipo de control, se constató que es verdaderamente imposible poder controlar 4 módulos a la vez con un control que dé la misma señal a los 4 módulos. Los valores obtenidos, además, han sido mucho peores que el mismo convertidor sin ningún tipo de control, ya que al ser cada módulo independiente entre sí, y cada uno presenta sus propias variaciones, no es posible controlar conjuntamente a los 4 con una única señal común para las cuatro ramas de interruptores. Por esto es por lo que al realizar este tipo de control, los módulos no han trabajado conjuntamente, y el sistema se satura con facilidad. Al dar la señal del módulo 1 a todas las entradas de los módulos, no es posible este tipo de control. Es por lo que se introdujo un control por cada segunda rama de interruptores, siendo en total 4 sensores de corriente y cuatro señales de control para los interruptores. A continuación se puede ver el estudio más detalladamente

*LAZO DE CONTROL CERRADO DE LA CORRIENTE DE SALIDA DE CADA MÓDULO,
CONTROLANDO INDIVIDUALMENTE LA ENTRADA DE CADA MÓDULO*

Como ya se ha explicado anteriormente, la imposibilidad de controlar los 4 módulos a base de una única señal de control igual para las 4 segundas ramas de convertidores, ha conseguido que se tome otra solución. Ésta es colocar un control en lazo cerrado por cada módulo, exactamente igual al explicado en el apartado anterior,



pero modificando la posición del sensor de corriente, colocándolo ahora a la salida de cada módulo, y no a la salida de todos los convertidores.

La razón por la que se controla la corriente y no la tensión, es porque como hemos visto en el convertidor de partida, los valores más cercanos al objetivo con el simple dimensionado del convertidor son los de la tensión.

Sin embargo, como se ha podido observar en el apartado anterior, sin ningún control, la corriente se movía en unos valores cercanos a los objetivos, pero con rizados inaceptables. Por ello se ha entendido que es necesario controlar la corriente, para mantenerla en valores muy próximos a los objetivos, con unos rizados mínimos, como ya ocurre con la tensión sin ningún tipo de control.

A continuación se puede ver en la ilustración 32, cómo se han implantado los controles, con una vista en detalle de los mismos en la ilustración 33

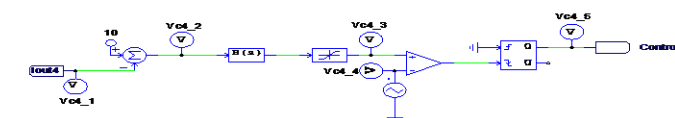
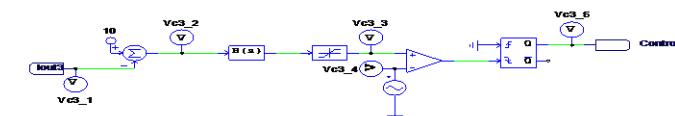
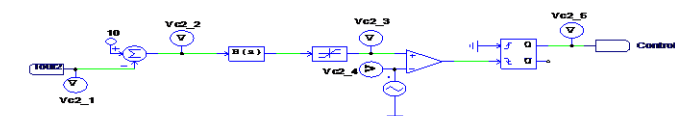
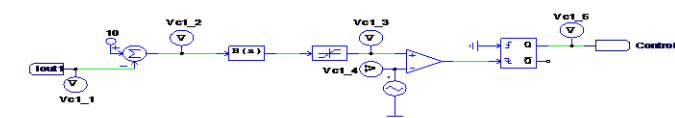
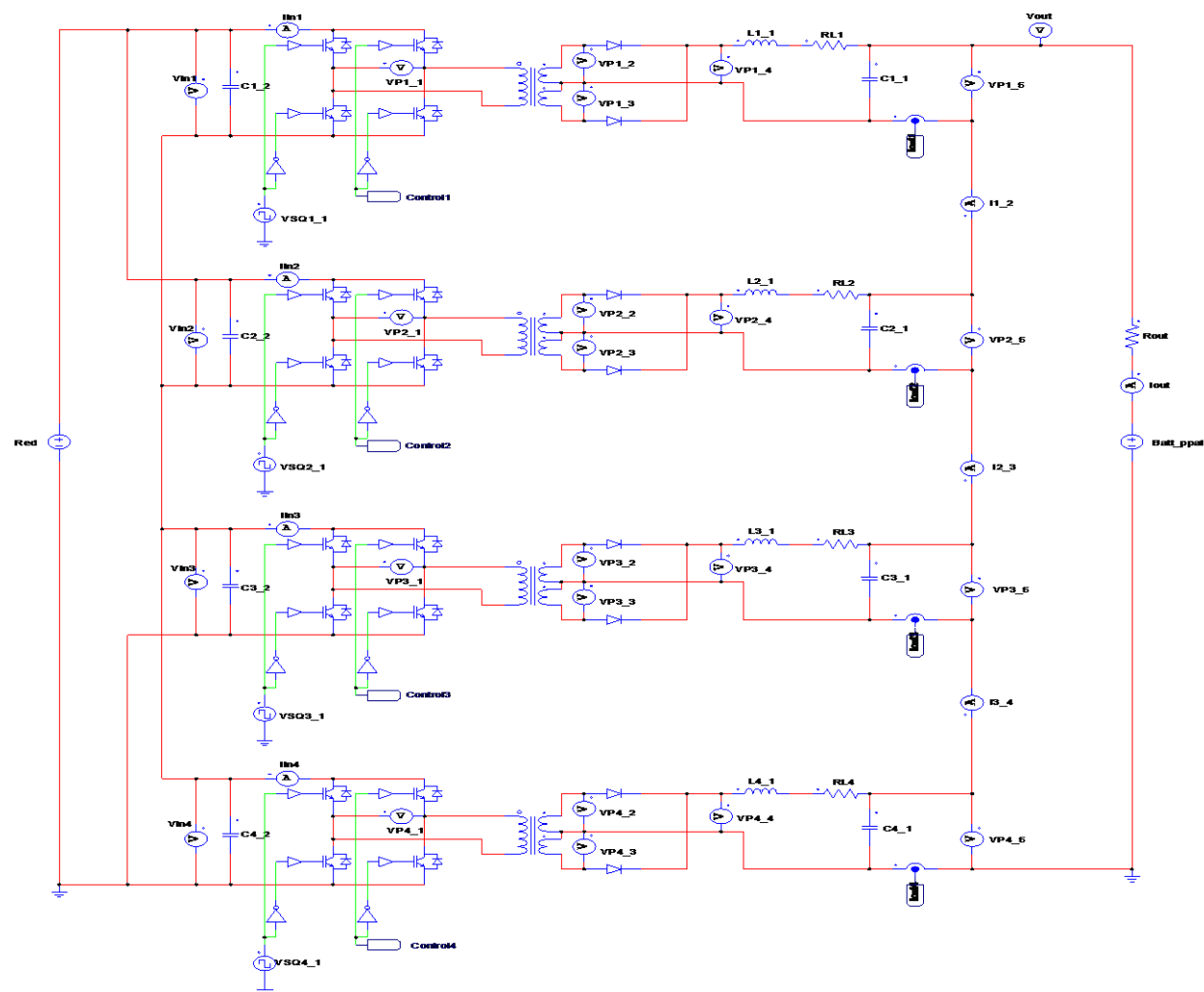


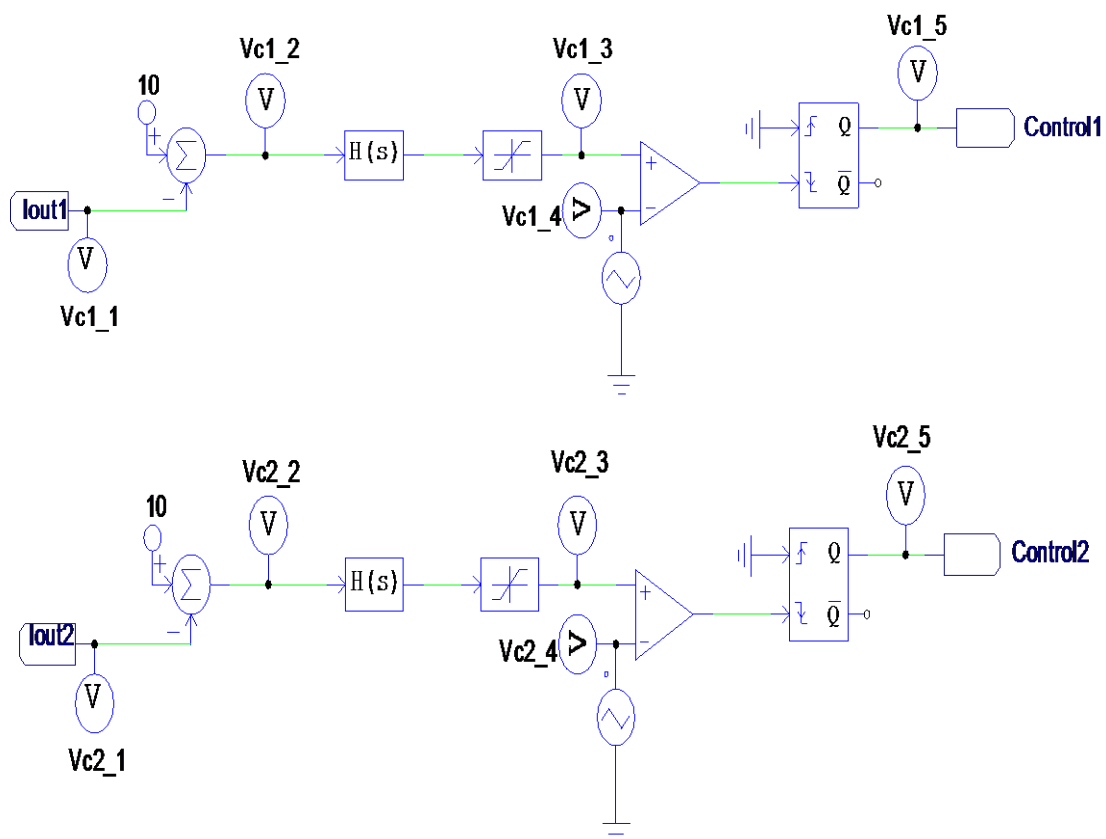
Ilustración 32: Convertidor con lazo de control cerrado de corriente individual para cada módulo

Estudio, diseño e implementación de un convertidor de potencia para coche eléctrico

Guillermo López Arias – Trabajo Fin de Grado

Como se puede apreciar, a la salida de cada módulo se mide la corriente mediante un sensor, que se envía al lazo de control, el cual al compararla con una referencia de 10 A, nos proporciona el error que hay entre la referencia y la medida. Más tarde, como ya se ha explicado, esa señal se compara con otra de carácter triangular con la misma frecuencia que la de los interruptores, y se pasa a través de un monoestable que da el impulso de la señal cuando ésta se encuentra en un flanco de bajada. La frecuencia de este monoestable es del doble que la de conmutación, es decir, 40 kHz. Ese impulso es el que se da a la segunda rama de los interruptores de cada módulo en este caso, que corregirá su ciclo de trabajo para adecuarlo a la referencia de 10 A de corriente de salida que es el objetivo.

A continuación se puede ver los 4 controles de los módulos en detalle:



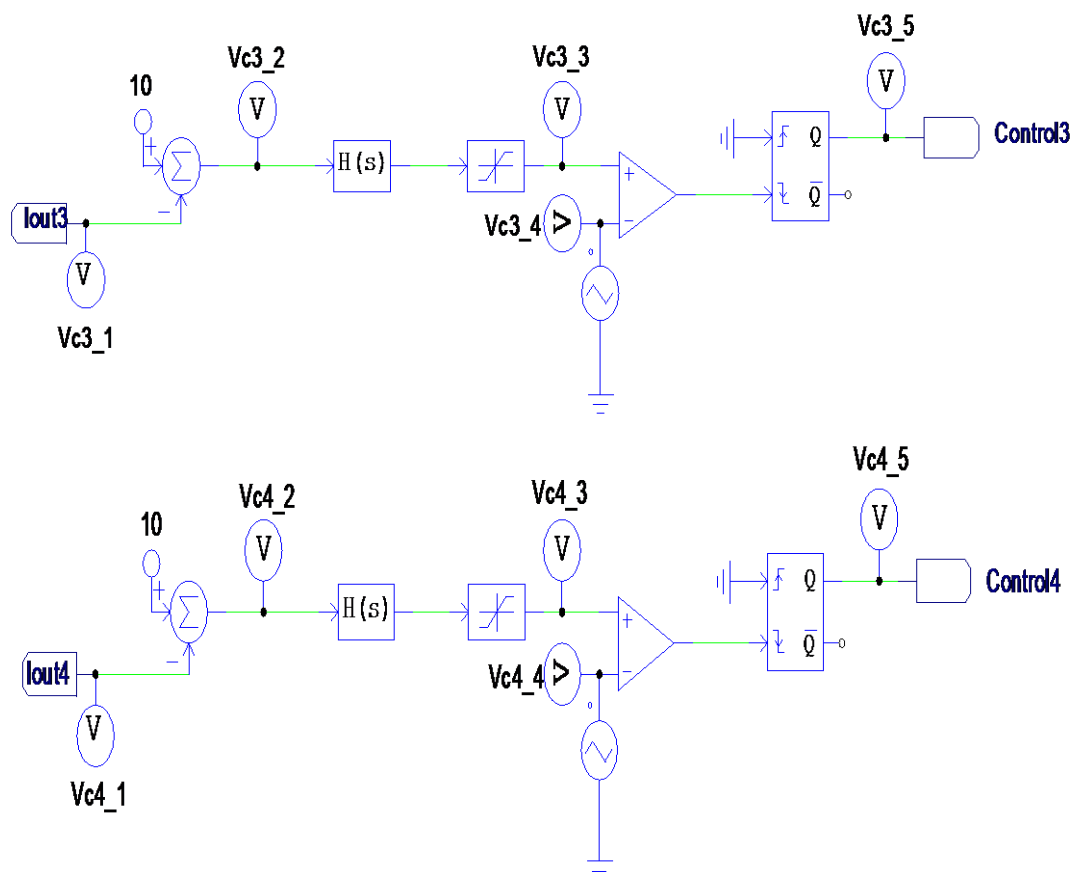


Ilustración 33: Detalle del control de cada módulo

En la siguiente ilustración se puede observar la simulación realizada con el control detallado anteriormente:

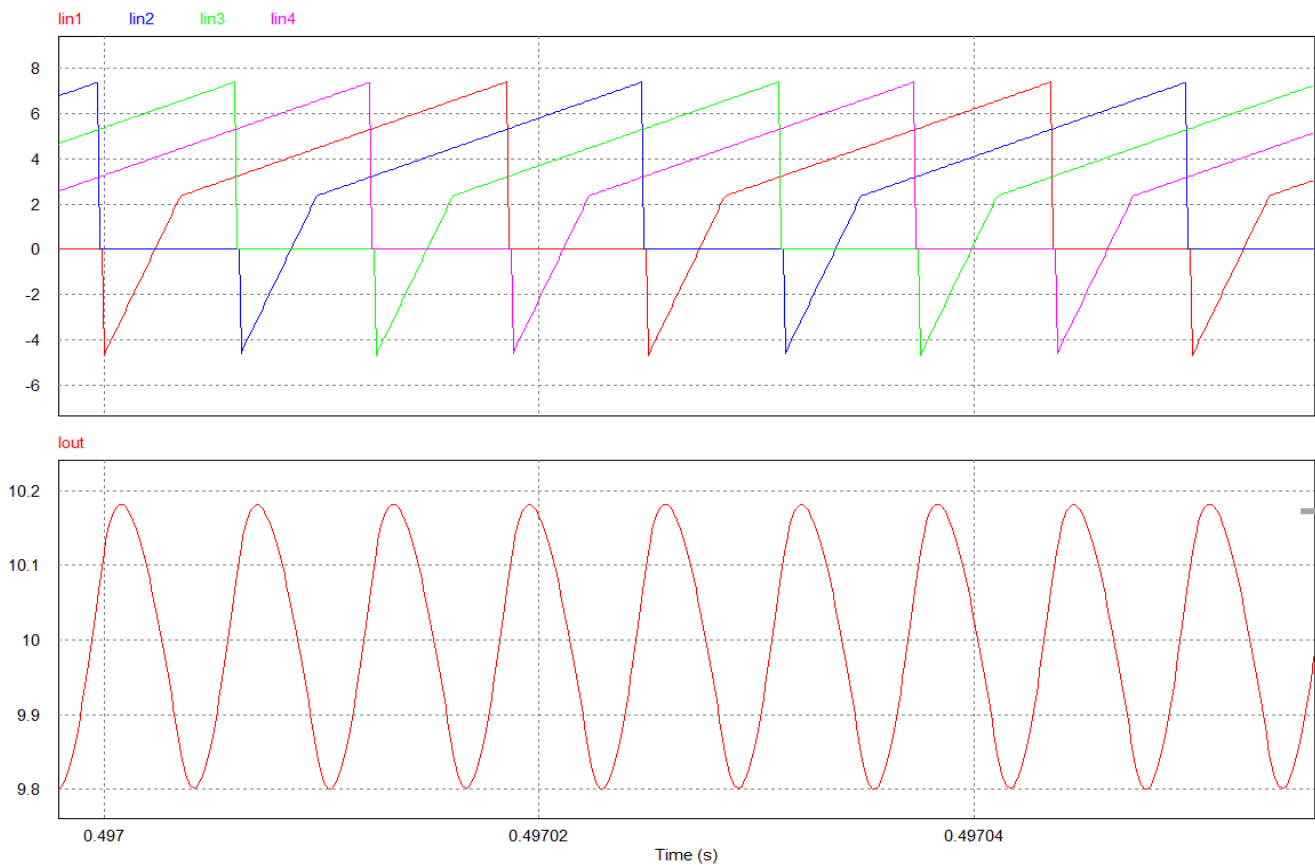
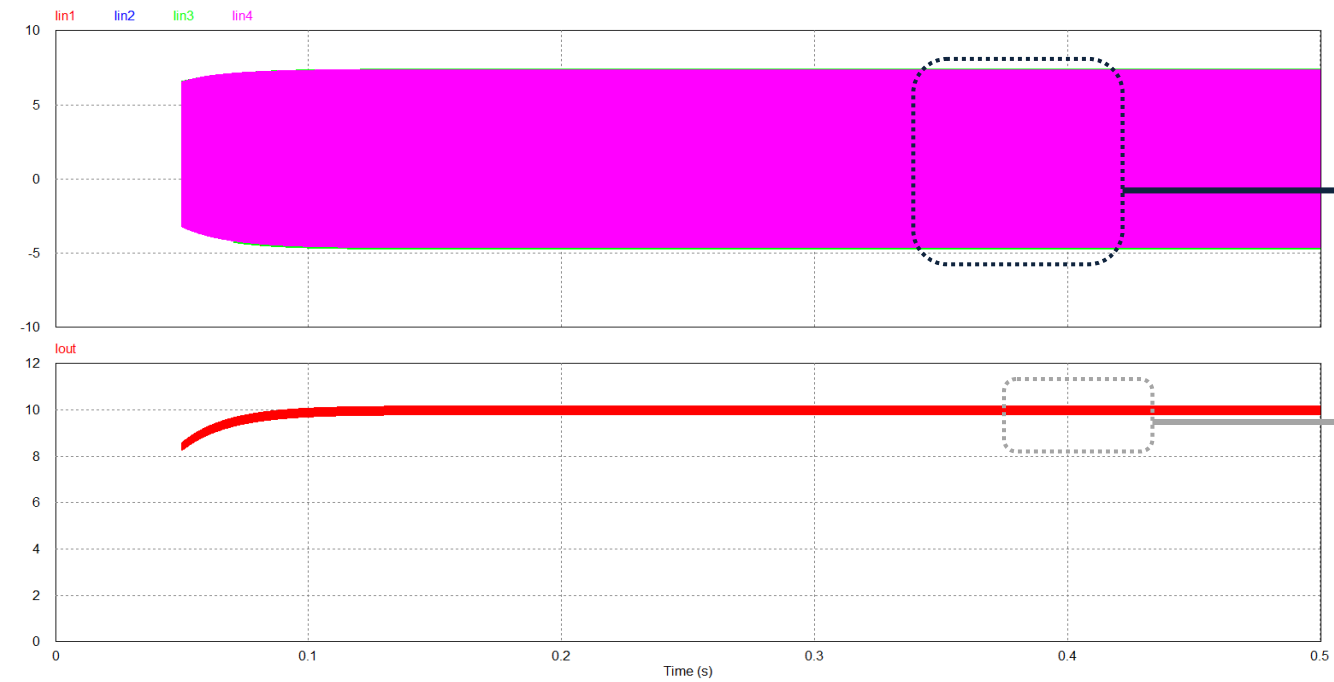


Ilustración 34: Simulación de la corriente de entrada y salida del convertidor con el control individual por módulo



Como se aprecia, el cambio es realmente significativo, ya que la corriente de entrada se mantiene prácticamente invariable, con unos valores máximos de aproximadamente 6 A y un valor medio de 3 A, mientras que a la salida, se ha conseguido que la señal, tras un transitorio de 0,12 seg. llegue al valor nominal de 10 A, con un rizado mucho más pequeño que el que se tenía sin el control. Con estos cambios, se ha conseguido que el rizado sea de apenas $\pm 0,2$ A, algo ya aceptable para la aplicación que se está estudiando.

A parte del control que se ha implementado, se ha conseguido que el rizado sea aún más pequeño haciendo desfase las señales de los interruptores de la siguiente manera:

Módulo	Desfase (°)
1	0
2	45
3	90
4	135

Si se realiza esto, se consigue que algunos armónicos se anulen entre los 4 módulos, de ahí una de las grandes ventajas del empleo de convertidores modulares, ya que se puede reducir de manera muy notable el rizado tanto de la corriente como de la tensión a la salida del convertidor. En la ilustración siguiente se puede observar el efecto de este desfase en la tensión:

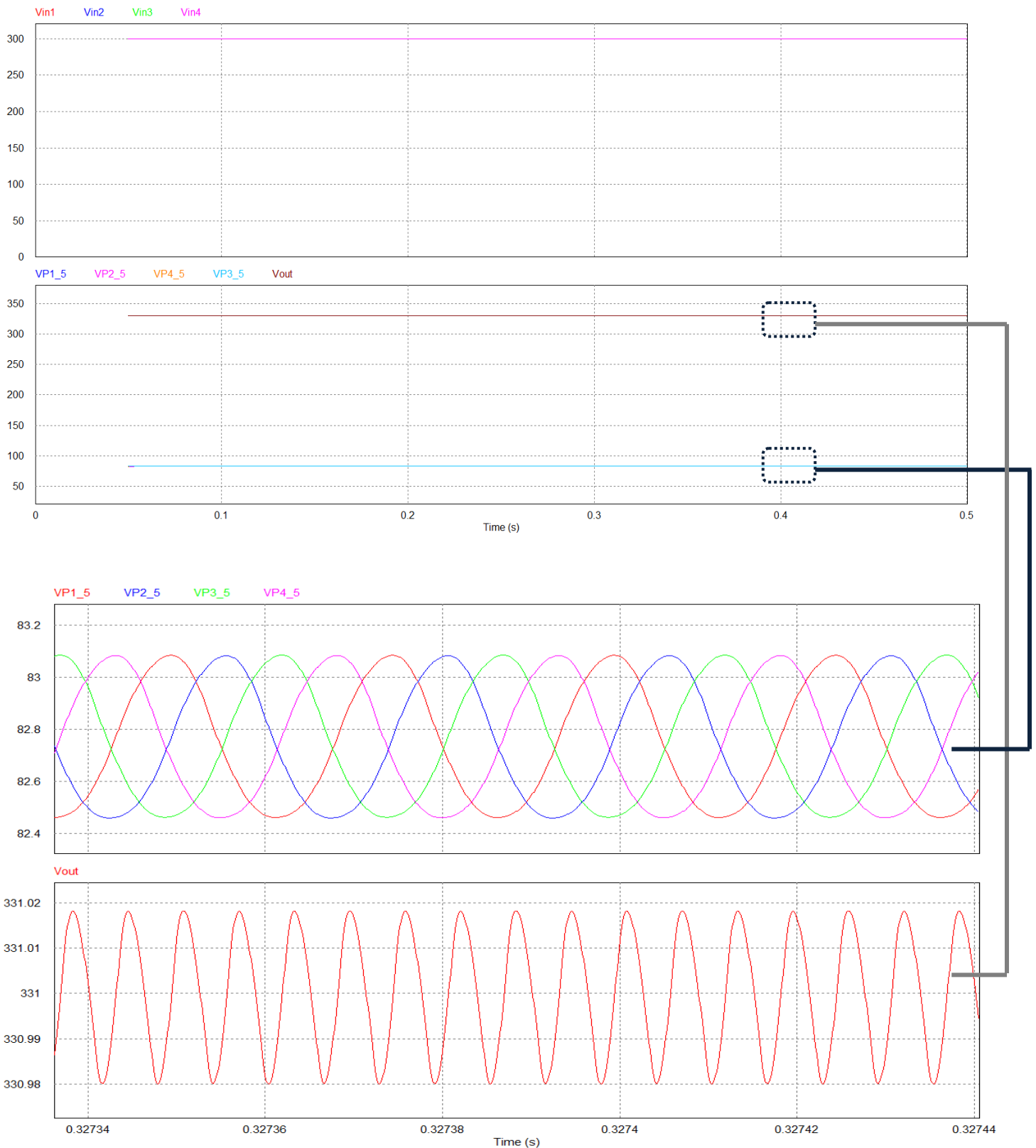


Ilustración 35: Simulación de la tensión de salida total (arriba) y por cada módulo (abajo)



Como ya se ha comentado anteriormente, al desfasar las señales de conmutación entre los módulos, se consigue que aunque el rizado de la tensión por módulos sea de 0,25 V aproximadamente, aunque en valores en torno al nominal de 82,75 V, en el caso de la señal de salida total, se aprecia que el rizado es minúsculo, de 0,02 V, dando como resultado una señal continua prácticamente, muy estable, en torno a 331 V. Estos resultados, ya se pueden considerar bastante aceptables para la aplicación que se está estudiando. A continuación se pueden observar las conclusiones extraídas del análisis de sensibilidad realizado al convertidor (análisis completo incluido en el Anexo 1 del Trabajo):

Caso	Variable	Conclusiones
1	Convertidor de partida	El convertidor de partida funciona bastante bien, todo es estable
2	Desfase de las fuentes triangulares de control a 45, 90 y 135 grados en las fuentes 2, 3 y 4 respectivamente	El sistema funciona incluso mejor, ya que el rizado en la tensión y corriente de salida es mucho menor que en el caso anterior
3	C1_2 de 750u a 500u	La salida de los módulos no depende mucho del valor del condensador de entrada
4	Todos los CX_2 a 1000u	Si todos los condensadores de la entrada son iguales, no hay cambios.
5	Lo anterior y L1_1 de 50u a 500u	Cuanto menor es el valor de L, la señal de salida es menos continua, oscila más, pero los valores son los mismos
6	Todas las LX_1 a 500u	Cuanto menor es el valor de L, la señal de salida es menos continua, oscila más, pero los valores son los mismos
7	Todas las LX_1 a 100u	Cuanto menor es el valor de L, la señal de salida es menos continua, oscila más, pero los valores son los mismos
8	Lo anterior y C1_1 de 50u a 500u	Cuanto menor es el valor de C de salida, la señal de salida es menos continua, oscila más, pero los valores son los mismos



Caso	Variable	Conclusiones
9	Todos los C1 a 500u	Cuanto menor es el valor de C de salida, la señal de salida es menos continua, oscila más, pero los valores son los mismos
10	Todos los C1 a 100 u	Cuanto menor es el valor de C de salida, la señal de salida es menos continua, oscila más, pero los valores son los mismos
11	Lo anterior con C1 y L1 todos a 100 u y Rout de 0,1 a 1	Si Rout es más alta, la tensión sube mucho y la corriente baja bastante también, si la Rout es baja, pasará al contrario
12	RL1 de 0,01 a 1, las demas RL a 0,01, Rout a 0,1	Al subir una Resistencia de los cuatro módulos, la corriente no cambia, sin embargo la tensión en ese módulo cae y los otros modulos compensan esa caída

Tabla 1: Conclusiones del análisis de sensibilidad para el control individual de la corriente

Como se puede apreciar en las conclusiones, el control individual por módulo en lazo cerrado mediante la medición de la corriente de salida y su posterior cambio en el ciclo de trabajo a la entrada, nos permite un muy buen control, aunque haya diferencias entre los módulos muy pequeñas, de más del 10% en alguno de sus componentes, la salida tanto de la tensión como de la corriente, puede presentar algún cambio, pero no muy significativo, ya que los niveles nominales de tensión y corriente se mantienen estables, la única diferencia apreciable es el rizado que presentan éstas, sobre todo la corriente, en algunos casos concretos. Pero en líneas generales, el control realiza muy bien su función, con lo cual, el resultado es bastante satisfactorio.



*CONTROL DE LA TENSIÓN DE SALIDA DE CADA MÓDULO CON REFERENCIA DE
CORRIENTE CONJUNTA PARA LOS 4 MÓDULOS, Y CONSIGNA PARA LA ENTRADA
INDIVIDUAL PARA CADA MÓDULO*

En este apartado se estudiará un nuevo método de control del convertidor modular. Este nuevo método consiste en realizar un control en lazo cerrado sobre la tensión, en vez de la corriente como lo estudiado en el apartado anterior, aunque tiene una peculiaridad, y es que, por medio de la medición de la corriente a la salida de uno de los módulos (aunque al estar todas las salidas conectadas en serie es como si se midiera la corriente de salida total), se realiza un control de la corriente, que proporciona un error de la misma frente a una referencia, y a la salida de este control, da una tensión de referencia que se compara con la salida de tensión de cada módulo, y así se comparará la salida de tensión con una referencia que viene de comparar la corriente de salida con la referencia de corriente que se quiere conseguir. En definitiva, es un control de la tensión en lazo cerrado con referencia de corriente.

A continuación se puede observar la implantación del nuevo tipo de control del convertidor, y seguidamente, un detalle de la parte de control.

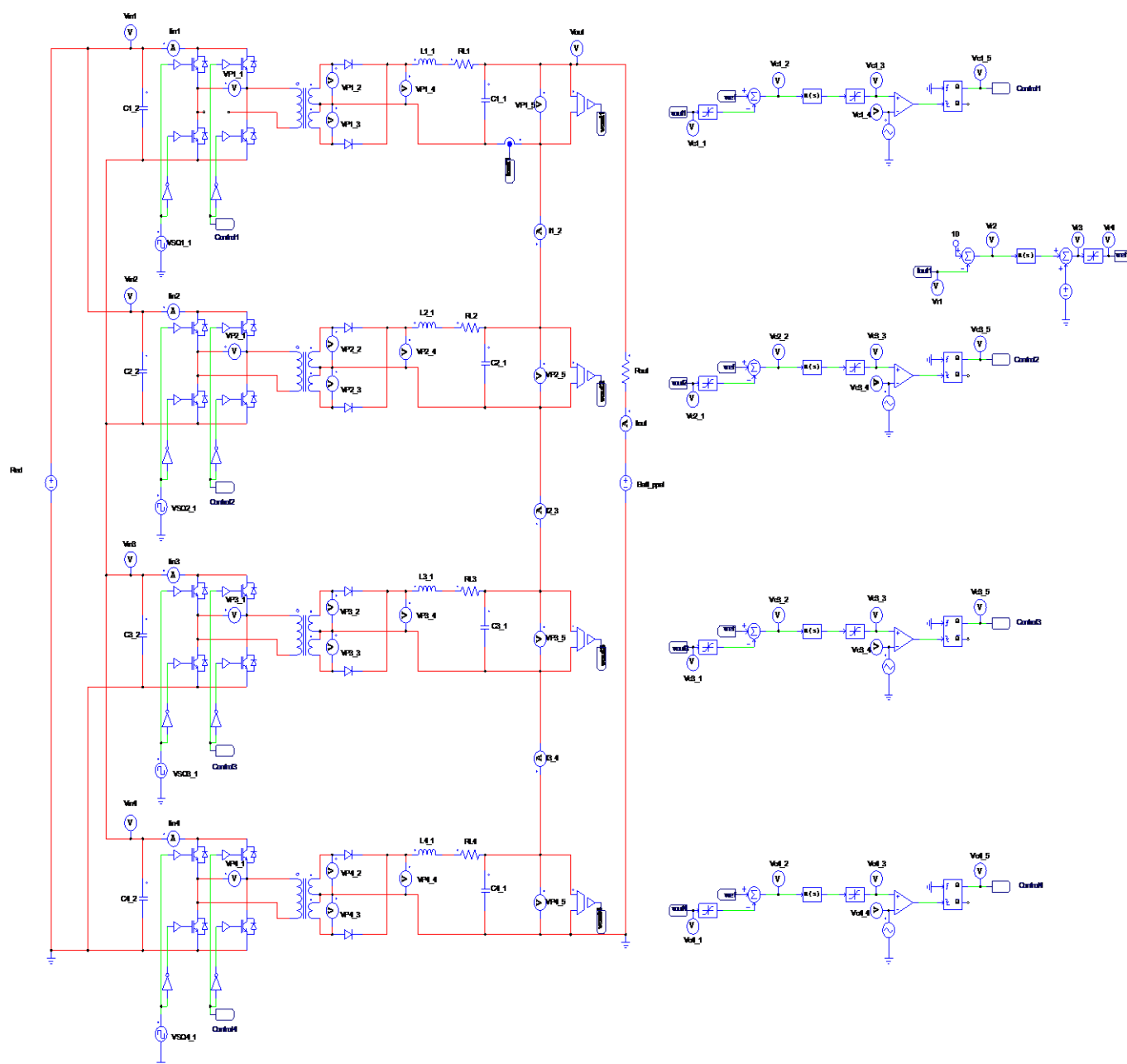


Ilustración 36: Convertidor modular con control de tensión en lazo cerrado con referencia de corriente

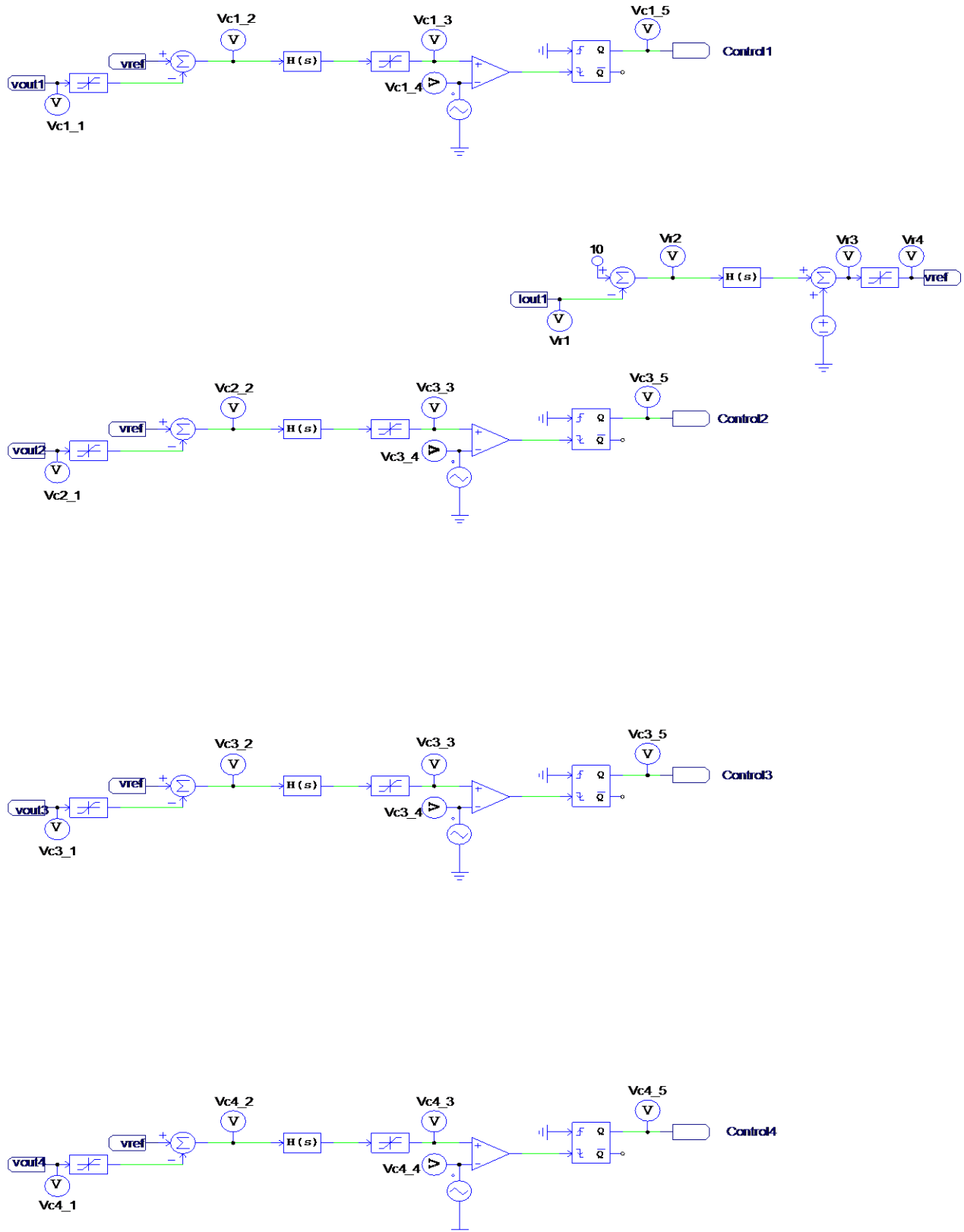


Ilustración 37: Detalle del lazo de control con la referencia de corriente



En la ilustración 37 se puede observar el control con más detalle. Como se explicaba anteriormente, se toma una medida mediante un sensor de la corriente de salida de todo el convertidor, ya que aunque se tome a la salida de un módulo, al estar conectados en serie a la salida, la corriente será la misma en cualquier punto. Una vez se mide esa corriente, ésta medida se compara con un valor de referencia, que en este caso son 10 A, que es lo estipulado por el fabricante para la carga de la batería principal.

El error que sale de comparar esas dos señales, se lleva a un integrador, y se suma a una señal de 82,5 V, que es la tensión de referencia que debe tener cada uno de los módulos. Esta tensión, no se permite que sea mayor que 85 V ni menor que 80 V, para evitar que el sistema se sature (de ahí que se haya implantado un limitador), y esa señal será la de referencia para el control de la tensión.

Una vez que se obtiene ese valor de referencia, este se compara con la señal de salida de cada módulo, exactamente igual que lo que ocurría en el control analizado anteriormente. De esta comparación, en el que un sumador tiene una entrada positiva que es el valor de referencia y una entrada negativa que es el valor real de la tensión de cada módulo, sale un error o diferencia entre estas dos señales, la cual se pasa por un integrador en primer lugar, y por un limitador, que extraerá una señal del valor del ciclo de trabajo que debe imponerse a la entrada, limitado a un máximo de 0,45.

Esta señal, se compara por medio de un comparador con una señal triangular de frecuencia 20 kHz, la misma que la de conmutación y se lleva a un monoestable, que dará un impulso en el flanco de bajada de la comparación. Con esto, aseguramos que los impulsos de la señal, concuerden con el ciclo de trabajo que debe imponerse a la entrada, para que el error entre el valor de referencia de tensión, que viene de medir la corriente de salida, y la tensión propia de cada módulo de salida, se mínimo y así poder garantizar que a la salida se tienen los valores nominales de tensión y de corriente con el mínimo rizado posible.

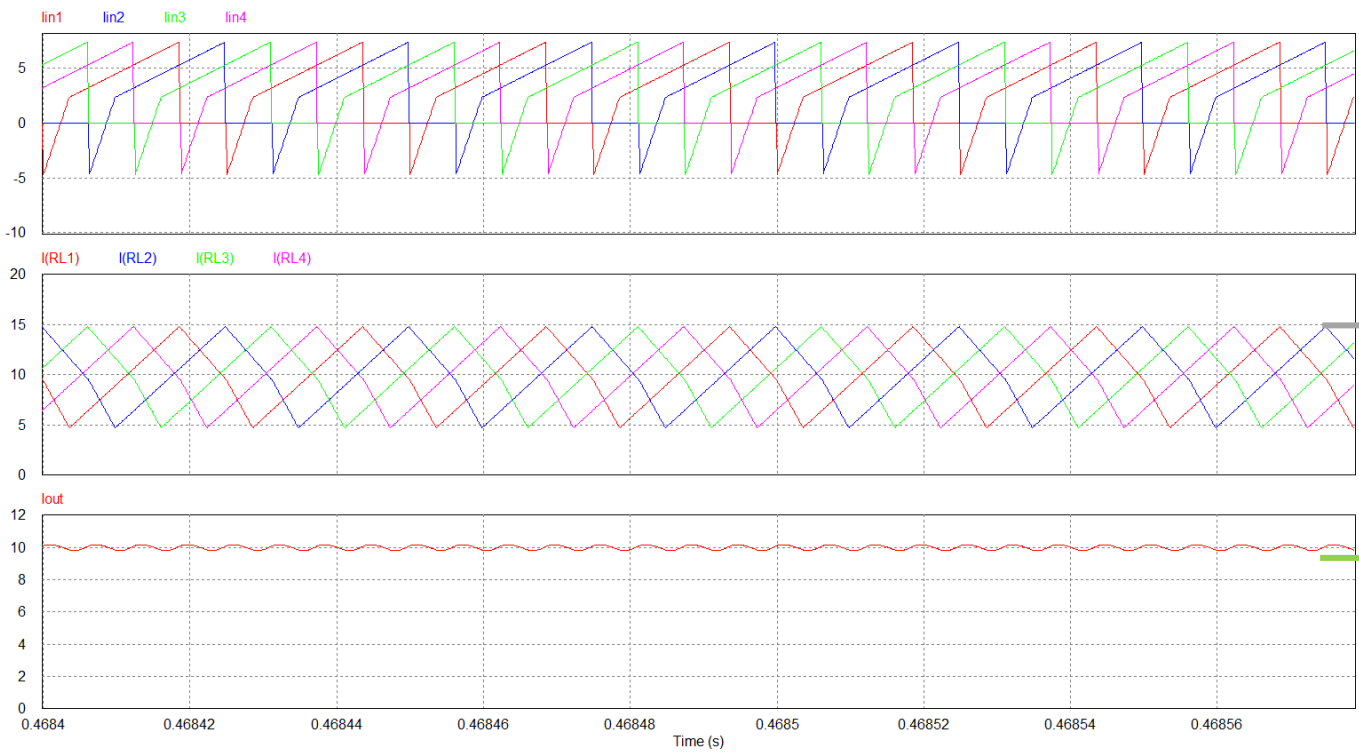
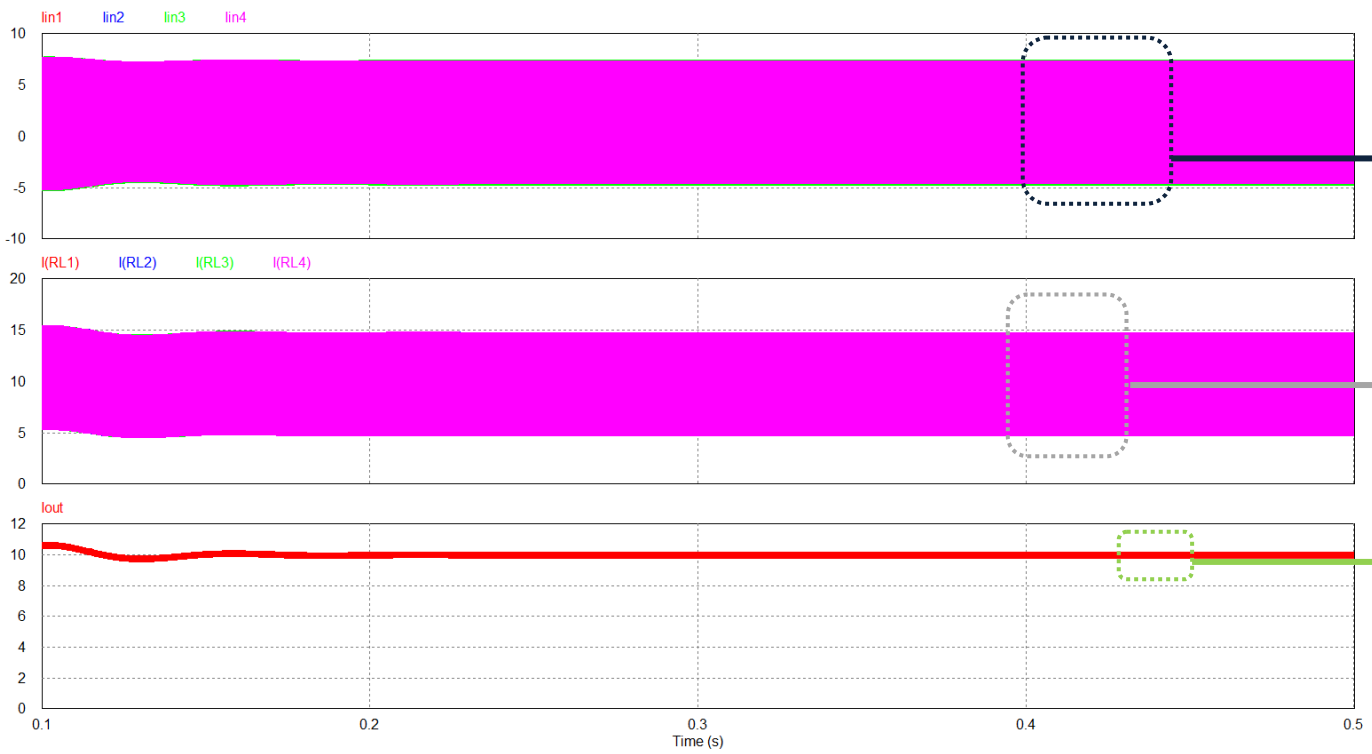


Ilustración 38: Simulación de la corriente, tanto de salida como de entrada



En la primera gráfica de la ilustración 38, se puede observar la corriente de salida de cada módulo, la cual se sitúa con un valor medio de 10 A aunque el rizado de la misma es enorme, de 5 A, algo que se debería de corregir a la salida de todos los módulos. Para corregir este rizado, se ha optado por desfasar la señal de conmutación, como en el control anterior, de la siguiente manera:

Módulo	Desfase (°)
1	0
2	45
3	90
4	135

Con esto se consigue que algunos armónicos se vayan anulando entre los módulos, con lo cual, el rizado se reduce de forma muy notable, hasta casi anularse por completo. Para ver el cambio, basta con fijarse en la segunda gráfica de la ilustración anterior, y compararla con la primera gráfica. Mientras que a la salida de cada módulo, el rizado de la corriente es de 5 A aproximadamente, a la salida de todos los módulos, el rizado de la corriente es de 0,25 A, es decir, es un 95 % menos de rizado. Una vez realizado esto, se observa que la corriente está en el valor nominal, es decir 10 A, y prácticamente la señal es continua.

Por otro lado, si se observa la última gráfica de la ilustración anterior, que es la corriente de entrada a cada módulo, ésta tiene un valor medio de 3 A, con un rizado de 4 A, lo que da una corriente máxima en el primario de 7 A, un valor que cada módulo aguanta sin problemas.

A continuación se estudiará la simulación de la tensión de salida del convertidor, y a la entrada en los cuatro módulos.

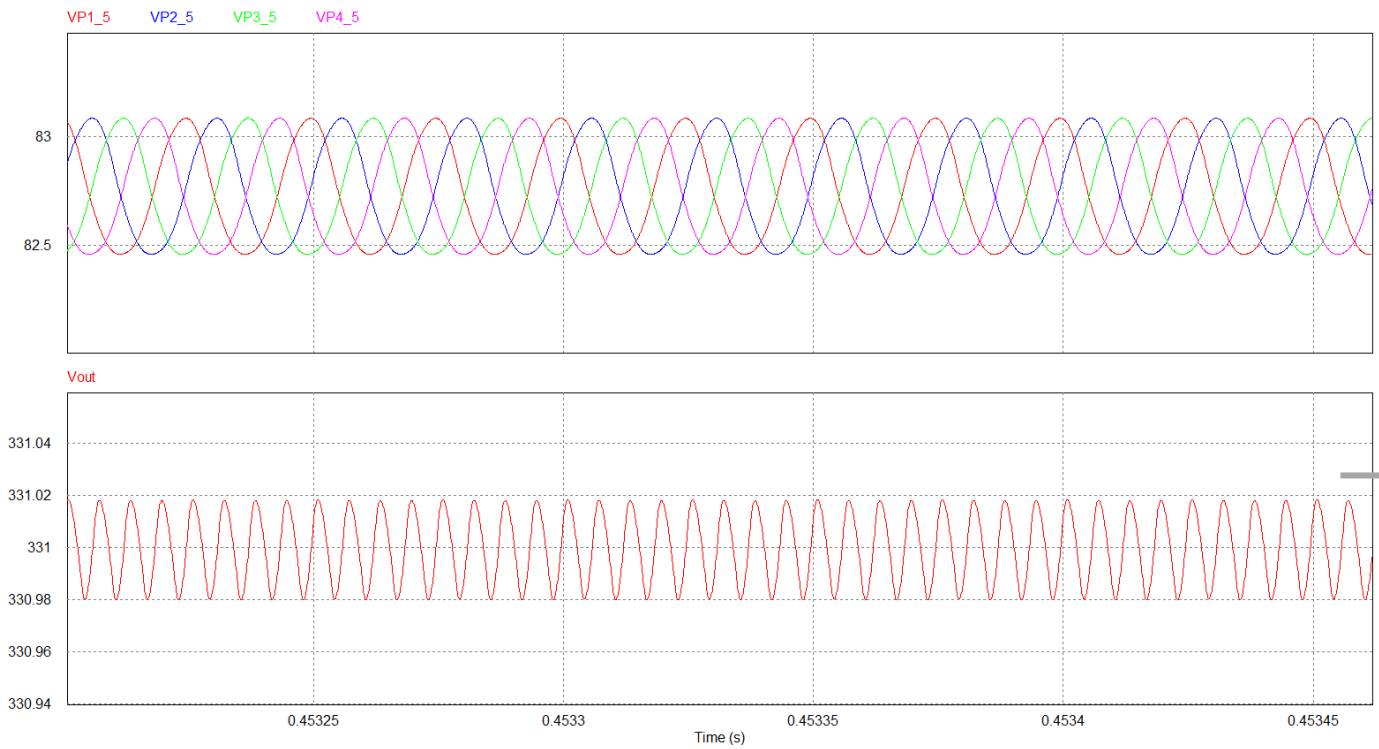
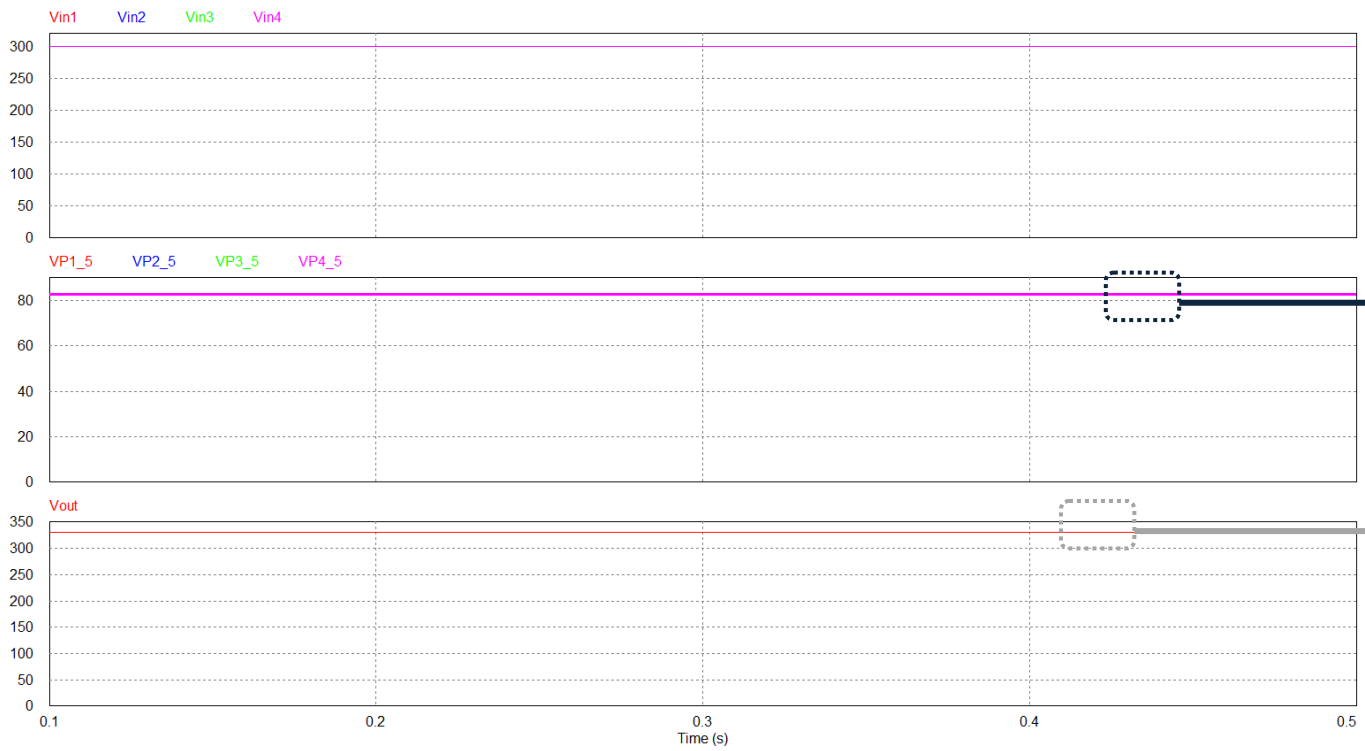


Ilustración 39: Simulación de la tensión de salida del convertidor

En el caso de la primera gráfica en la que se observa la tensión de entrada en cada módulo del convertidor, se puede apreciar que a cada módulo entran 300 V de tensión. La segunda y tercera gráfica corresponden a las tensiones de salida por módulo y total del convertidor. Se aprecia que cada modulo entrega 82,75 V en corriente continua con muy poco rizado, de apenas 0,5V, y en el caso de la última gráfica, se aprecia que la tensión total está en el valor nominal, 331 V, y que su rizado, como ya ocurría en los otros casos, es prácticamente nulo, siendo el máximo 0,02 V, con lo cual la señal es totalmente continua.

Si se observa la segunda gráfica de la ilustración, y se compara su rizado con el de la última gráfica, se ve que el rizado mucho mayor en la tensión de salida por módulos que en la tensión de salida total.

Como pasa en el caso de la corriente, el rizado a la salida total es mucho menor que a la salida de cada módulo por separado, y es debido a ese desfase en las fuentes de conmutación de cada módulo que se explicaba más arriba. Al anularse los armónicos entre los módulos, el rizado casi se anula por completo.

Como se aprecia, se tiene una muy buena respuesta con este tipo de control, en el que se controla la tensión, aunque se controla a partir de una referencia de la corriente de salida.

Caso	Variable	Conclusiones
1	Desfase de las fuentes del pulso de 45, 90 y 135 grados en los módulos 2,3 y 4 respectivamente	El convertidor de partida funciona bastante bien, todo es estable
2	CX_2 a 750μF	Por debajo de 750μF, la respuesta es estable pero diverge en todos los aspectos a partir de 0,4 seg, se decide volver al condensador de 750 μF
3	C1_2 de 750μF a 720μF	Con un condensador de entrada algo distinto a los demás (un 10% de diferencia) el sistema aunque tiene cambios, es estable
4	Todos los CX_2 a 750μF y L1_1 de 100μH a 95μH	Con una bobina de salida algo distinta a los demas (un 5% de diferencia) el sistema aunque tiene cambios, es estable, y el rizado de las variables de salida es mayor

Caso	Variable	Conclusiones
5	Todas las LX_1 a 50 μ H	Si todas las L de salida son iguales, hay algo más de rizado, pero el sistema trabaja muy bien
6	Todas las LX_1 a 500 μ H	Sistema saturado, se vuelve a 50u para las bobinas de salida
7	Todas las L1 a 50 μ H y C1_1 de 100 μ F a 95 μ F	En cuanto hay un condensador algo distinto (5%), el sistema presenta algunos cambios mínimos, pero es estable, con un rizado algo mayor
8	Todos los C1 a 50 μ F	Si todos los condensadores de salida son iguales y pequeños, el sistema trabaja uy bien, muy estable y con poco rizado
9	Todos los C1 a 500 μ F	En el caso del condensador de salida, su valor puede ser alto, pero es preferible uno pequeño para que sea muy estable
10	Lo anterior con C1 y L1 todos a 50 μ F y Rout de 0,1 a 1 Ω	La corriente se descontrola totalmente mientras que la tensión de salida total es estable, aunque la tensión de cada módulo no está controlada tampoco
11	Rout a 0,1 Ω , RLX a 0,1 Ω	Una respuesta muy buena
12	RL1 a 0,12 Ω , RL3 a 0,11 Ω y RL4 a 0,085 Ω	Si todas las RL son iguales, todo va bien, pero en cuanto hay cambios, el sistema es estable muy poco tiempo, después se descontrola

Tabla 2: Conclusiones al análisis de sensibilidad

Una vez estudiada la sensibilidad de este tipo de control sobre el convertidor, se puede apreciar que el control más sofisticado, que es éste último, es el más preciso, pero también el más sensible ante cambios. Si bien se consigue un resultado de tensión y de corriente a la salida en el que las señales son continuas totalmente y se mantienen muy estables en los valores nominales, también es cierto, que ante pequeños cambios en los componentes de los módulos, el funcionamiento, y en consecuencia, las señales de corriente y tensión de la salida, se ven mermados, ya que al ser tan preciso el control, cuando se presenta una pequeña variación entre módulos, el control no es capaz de gestionar correctamente esos cambios, que se escapan de su rango, y aunque mantiene los valores nominales, los rizados no son tan buenos como se desearía, llegando el control anterior, más sencillo, incluso a superar las prestaciones de éste.



RECONFIGURACIÓN DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA PARA LA CARGA DE LA BATERÍA AUXILIAR

En este apartado, se añadirá al convertidor la función de la recarga de la batería auxiliar, una vez el vehículo se encuentra desconectado de la red eléctrica, y la batería principal pasa a ser la fuente de alimentación de todo el vehículo. Para ello se ha llevado a cabo una reconfiguración para que en el lugar de la red eléctrica, la fuente de alimentación sea la batería principal de 330 V, y en el lugar que ocupaba ésta hasta ahora, se encuentre la batería auxiliar de 12 V.

Una vez estudiados los tipos de control, y comprobada su sensibilidad, se trabajará con el segundo tipo de control estudiado, es decir, el denominado, lazo de control cerrado de la corriente de salida de cada módulo, controlando individualmente cada entrada de cada módulo.

Se ha elegido este control por su versatilidad ante pequeños cambios entre los componentes de los distintos módulos, y porque el comportamiento que tiene el convertidor con este tipo de control es satisfactorio. A continuación, se podrá entender el nuevo funcionamiento del convertidor con los cambios de conexión necesarios para esta nueva función y se estudiará la sensibilidad del mismo, como ya se ha realizado anteriormente.

COMPROBACIÓN DEL ACOPLAMIENTO DEL MÓDULO 4 PARA LA CARGA DE LA BATERÍA AUXILIAR

Para la recarga de la batería auxiliar es necesario aislar los tres módulos que no son necesarios para esta tarea. Además, se ha de conectar la batería principal del coche de 330 V a la entrada del módulo que va a ser utilizado para esta función. A la salida del módulo, se conectará la batería auxiliar de 12 V, con sus correspondientes interruptores para que se conecte sólo cuando el vehículo no está conectado a la red.



Para que estas conexiones se realicen de manera correcta, es necesaria la colocación de interruptores que aislen y conecten lo siguiente:

- Aislar la fuente de alimentación de la red eléctrica, para ello, se colocará un interruptor a cada lado de la fuente que hasta ahora simulaba la entrada de la red eléctrica al convertidor.
- La misma señal que ha realizado el corte de la fuente de entrada de la red, también aislará el módulo número 4, que es el de más abajo, abriendo los interruptores que conectan éste con los demás módulos. Además, la misma señal aislará la batería principal de la salida del último módulo, para que así no haya riesgo de cortocircuito, ya que a la entrada la fuente de alimentación será ésta batería de 330 V y no se puede permitir que a la salida del convertidor esté conectada la misma fuente.
- Una vez que la señal Switch Red haya abierto los interruptores mencionados anteriormente, la nueva señal Switch Batt aux, conectará, mediante otros interruptores, la batería principal a la entrada del módulo, una vez que ésta queda aislada de la fuente de alimentación de la red.
- Esta señal (Switch Batt aux), también conectará a la salida del módulo la batería auxiliar de 12 V, con su correspondiente sensor de corriente y resistencia en serie. Una vez están conectadas la entrada y salida del módulo correctamente, con la batería principal de 330 V a la entrada y la batería auxiliar de 12 V a la salida, el convertidor comenzará a funcionar con un solo módulo para la recarga de la batería auxiliar cuando sea necesario.

A continuación se puede observar la colocación de los interruptores arriba mencionados, así como las nuevas conexiones:

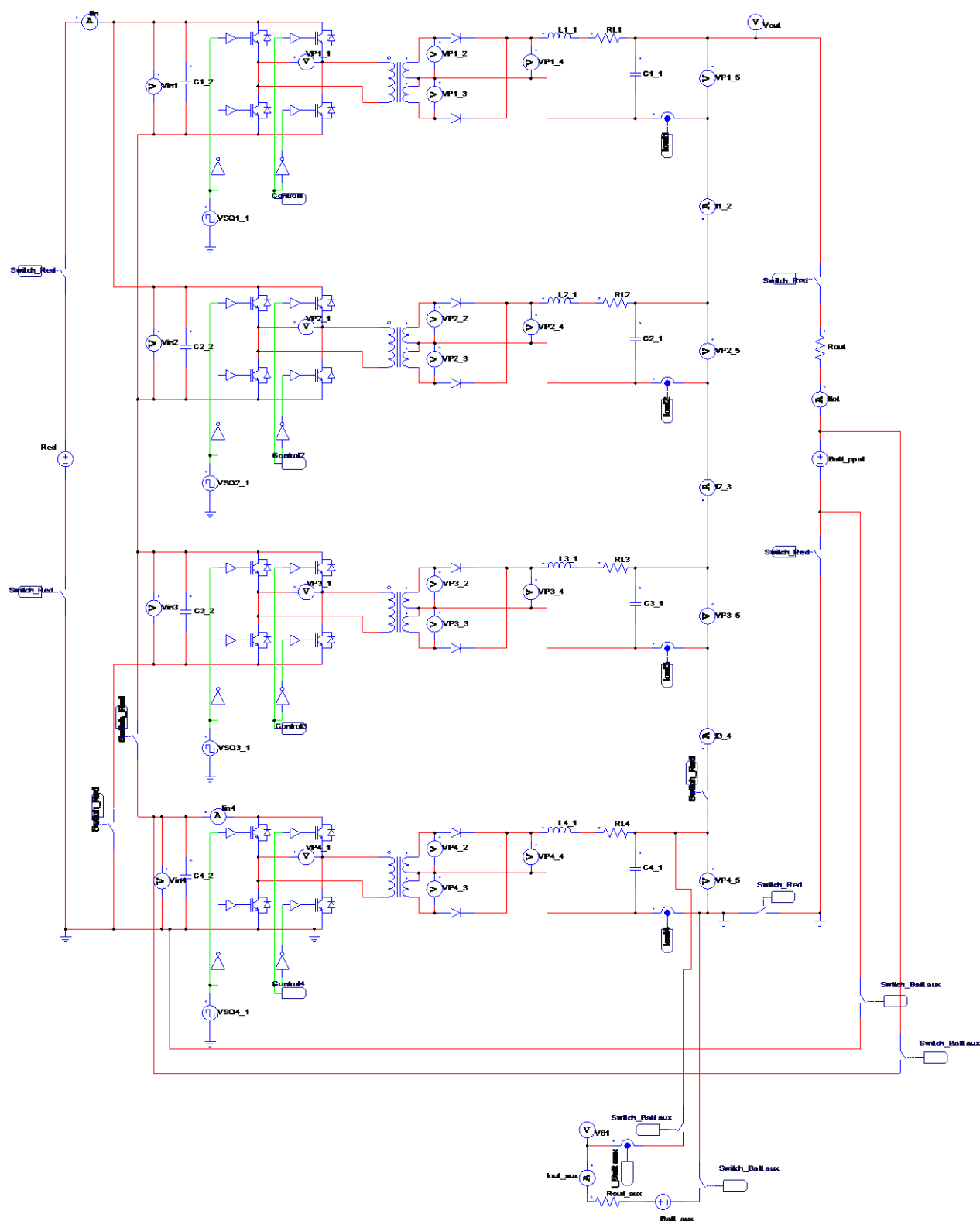


Ilustración 40: Conexión de la batería auxiliar al convertidor

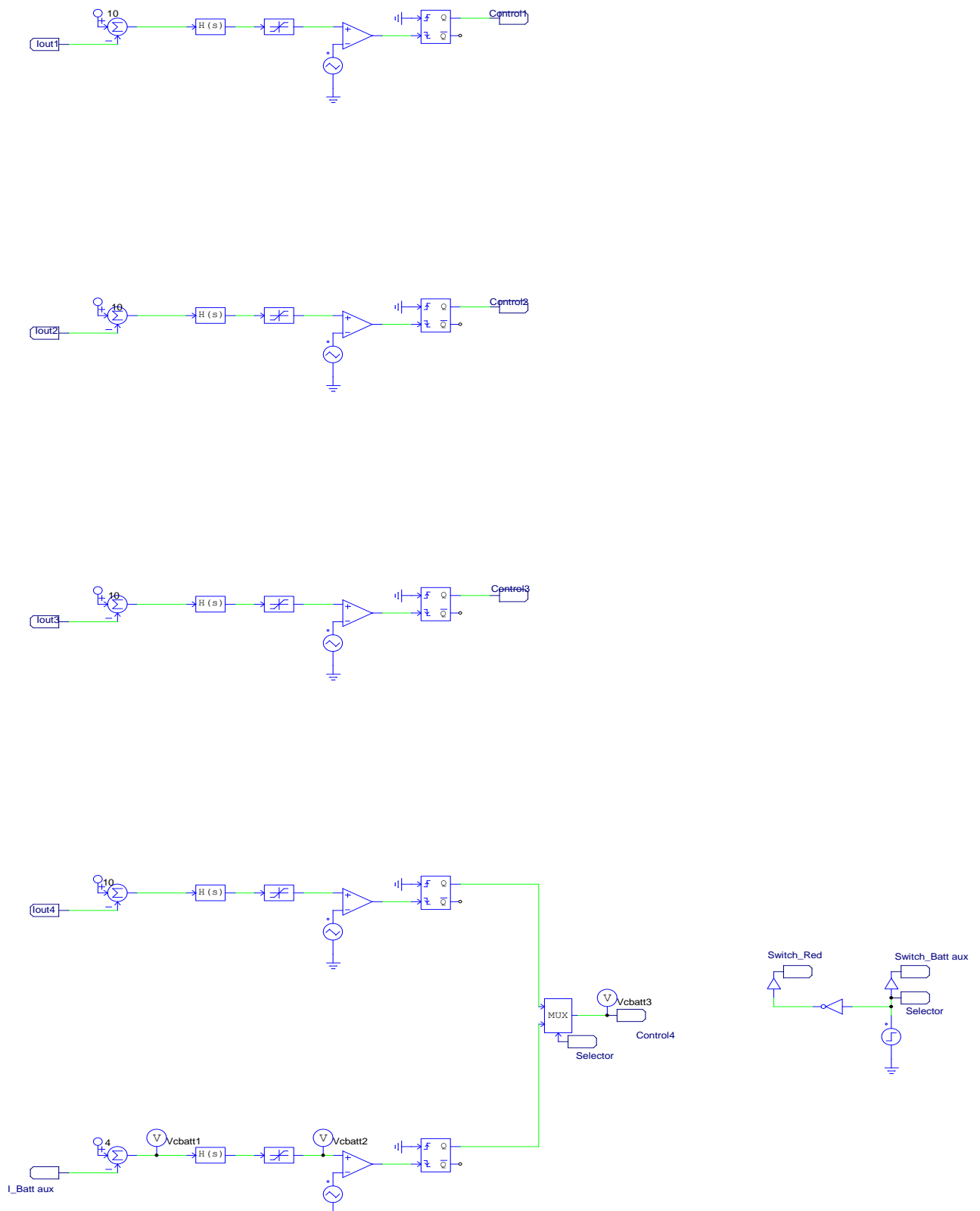


Ilustración 41: Detalle del control del convertidor



Para la conexión de la batería auxiliar, se ha simulado mediante escalones de tensión, un escenario en el que se desconecte de la red la batería principal, y en ese momento, se produzca el cambio a la conexión para la recarga de la batería auxiliar. Aunque este cambio provoque transitorios muy grandes, no se trata de estudiar el cambio de conexiones, que se realizaría de forma más suave en la implantación de este mecanismo, sino que se trata de comprobar que el funcionamiento del convertidor una vez se haya realizado el cambio y el transitorio pase, sea estable y se mantenga en los valores nominales de tensión y corriente tanto a la entrada como a la salida.

Con el fin de que los nuevos valores nominales de corriente y tensión se cumplan, se ha realizado un control exactamente igual que en el caso individual de cada módulo, controlando en lazo cerrado la corriente de salida del convertidor y modificando el ciclo de trabajo de los MOSFET de entrada. Modificando el ciclo de trabajo del convertidor, se llega a los 14 Vdc que son necesarios para la recarga de la batería, y a los 4 A que se necesitan a la salida.

Una vez implantado el control en lazo cerrado para la batería auxiliar, hay que coordinarlo con el control del último módulo que se ha empleado para la recarga de la batería principal. Para ello, a la salida de los dos convertidores, se instalará un multiplexor que mediante un selector colocado en las señales de escalón de la conexión, dará la señal de que sea el control del módulo para la batería principal o el control de la batería auxiliar, el que debe de enviar la señal a los MOSFET de la entrada para modificar el ciclo de trabajo. Con esto se consigue que trabaje el lazo de control correcto en cada situación, y el convertidor trabaje correctamente.

A continuación, se aprecia el lazo de control más en detalle, con el multiplexor a la salida con la señal Selector que indica qué lazo entra en funcionamiento en cada instante de tiempo:

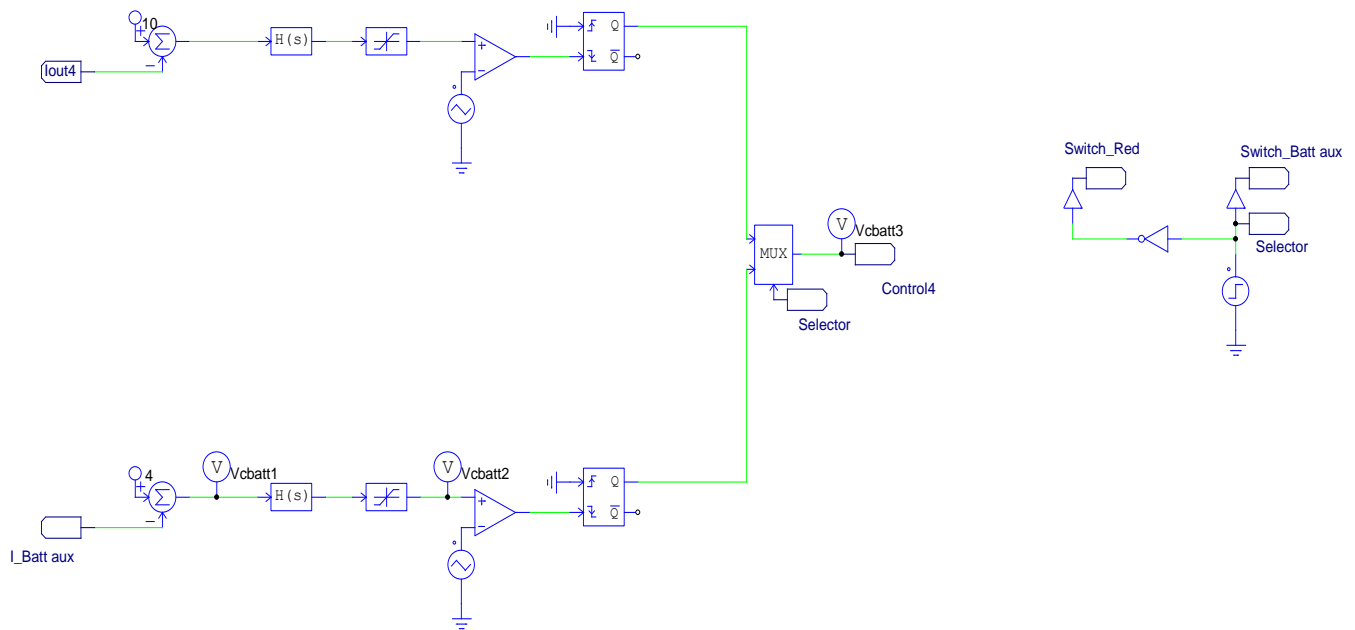


Ilustración 42: Detalle del control encargado de la carga de la batería auxiliar

ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD DEL MÓDULO 4 AL ACOPLAMIENTO DEL APARTADO ANTERIOR

Se puede apreciar una vez que se ha observado el comportamiento del convertidor junto con el control ante pequeñas variaciones en los componentes, que funciona correctamente.

Aun cuando las variaciones han sido muy grandes, el rizado tanto de la tensión como de la corriente no se ha visto muy afectado, y los valores siempre han estado entre los nominales, se puede ver a continuación en las conclusiones del análisis de sensibilidad (análisis completo en el anexo 3 del Trabajo).

Es por esto por lo que se ha elegido este tipo de control y no el de lazo cerrado de tensión con referencia de corriente, ya que este control es mucho más versátil ante los cambios en los componentes, y su comportamiento es bastante bueno.



Caso	Variable	Conclusiones
1	Convertidor de partida	Con el convertidor tal y como debería de estar, todo tiene un funcionamiento satisfactorio
2	C4_2 de 750 μ F a 500 μ F	Aunque el condensador de entrada sea muy distinto al inicial, el sistema, al menos para la carga de la batería auxiliar, funciona correctamente.
3	C4_2 de 500 μ F a 100 μ F	
4	L4_1 de 50 μ H a 10 μ H	
5	L4_1 de 10 μ H a 100 μ H	Al bajar el valor de la bobina de salida, el rizado aumenta, aunque muy poco. Ocurre lo contrario al subir el valor de la bobina
6	C4_1 de 50 μ F a 10 μ F, L4_1 a 10 μ H	
7	C4_1 de 10 μ F a 100 μ F, L4_1 a 100 μ H	
8	C4_1 a 100 μ F y L4_1 a 10 μ H	Cuanto mayor es el valor de cada componente del filtro LC, menor el rizado a la salida, aunque los cambios no son significativos. Por el contrario, una diferencia muy grande entre las magnitudes es la bobina y el condensador, dan peor resultado.
9	Rout de 0,1 Ω a 0,01 Ω	
10	Rout de 0,01 Ω a 1 Ω	
11	RL4 de 0,01 Ω a 0,1 Ω ; Rout a 0,1 Ω	Es preferible una resistencia muy baja, ya que el rizado es aceptable pero los valores se mantienen en lo nominal, con valores altos, la tensión a la salida se dispara
12	Caso definitivo: C2=750u C1=50u L1=50u Rout=0,1 RL=0,01	
		Resultado óptimo con estas condiciones



CONCLUSIONES

El presente Trabajo se ha centrado en el intento de mejora de un convertidor existente en un vehículo eléctrico, realizando un convertidor multi-puerto, compuesto por módulos, intentando que éste sea más económico, eficiente y flexible que los que tenía el coche anteriormente, siendo éste el objetivo principal del Trabajo.

A partir de esa premisa, se ha realizado un completo estudio de qué convertidor, de los existentes a día de hoy de corriente continua a corriente continua, era el más apropiado para esta aplicación. Una vez se ha elegido el tipo de convertidor, se ha realizado uno en el cual hay distintas entradas y salidas (multi-puerto), y está compuesto por módulos más pequeños. Con esto se ha intentado que el mismo reúna todas las aplicaciones posibles que se le pueden atribuir, como son la recarga de la batería principal y de la batería auxiliar, y que además, tenga un control que le permita hacerlo de forma autónoma, sin que ninguna centralita del vehículo tenga que enviarle ninguna señal.

Se ha conseguido que el convertidor modular trabaje satisfactoriamente, ya que se ha conseguido que los cuatro módulos trabajen en la misma dirección en la recarga de la batería principal que requiere un gran flujo de potencia, tensión y corriente, y además se han estudiado varios tipos de control para el convertidor, y se ha elegido el que era el más apropiado para estas aplicaciones, testándolos y realizando análisis de sensibilidad a los mismos.

Además, se ha conseguido que el convertidor tenga la flexibilidad suficiente como para que, de forma totalmente autónoma, éste pueda variar sus conexiones interiores para utilizar un único módulo para la recarga de la batería auxiliar a partir de la batería principal. Se ha conseguido modificar el control para que un módulo se



encargue de la recarga de la batería auxiliar y se ha coordinado el funcionamiento de éste, con el control de los módulos para la recarga de la batería principal.

Con todo esto, se puede concluir que, a falta de la implantación real, ya que durante el trabajo se ha simulado en el programa PSIM, un convertidor a base de módulos más pequeños, puede realizar el mismo trabajo que dos convertidores con componentes que tengan que soportar mayor tensión, y que por tanto puedan tener mayores pérdidas, tanto de conmutación como en su transformador, etc., y se pueden abaratar los costes de éstos, pudiendo aumentar además su eficiencia.

ANEXO I

Análisis de sensibilidad para el lazo de control cerrado de la corriente de salida de cada módulo

Caso	Variable	lin1	lin2	lin3	lin4	Iout	Vin1	Vin2	Vin3	Vin4	VP1_5	VP2_5	VP3_5	VP4_5	Vout	IR1	IR2	IR3	IR4	Conclusiones
1	Convertidor de partida	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Estable en torno a 10 A, entre 10,05 A y 9,95 A, triangular	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Triangular y estable en torno a 82,75 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V	Muy estable en torno a 331 V, triangular, y con un rizado mínimo	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	El convertidor de partida funciona bastante bien, todo es estable
2	Desfase de las fuentes triangulares de control a 45, 90 y 135 grados en las fuentes 2, 3 y 4 respectivamente	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Estable en torno a 10 A, con un rizado menos, de 0,02 A, triangular	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	331 V prácticamente continua, sin apenas rizado	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	El sistema funciona incluso mejor, ya que el rizado en la tensión y corriente de salida es mucho menor que en el caso anterior
3	C1_2 de 750u a 500u	Empiza en torno a 0 y va teniendo un rizado cada vez mayor para igualarse a las demas	Empiza en torno a 0 y va teniendo un rizado cada vez mayor para igualarse a las demas, mucho más despacio que lin1	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular	Estable en torno a 10 A, entre 11,5 A y 8,5 A, triangular	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Estable en 331 V	Onda sinusoidal en torno a 10 A, con un rizado de 3 A	Onda sinusoidal en torno a 10 A, con un rizado de 3 A	Onda triangular en torno a 10 A, rizado de 2 A	Onda triangular en torno a 10 A, rizado de 2 A	La salida de los módulos no depende mucho del valor del condensador de entrada
4	Todos los CX_2 a 1000u	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular, con un valor medio de 0,5 A	Estable en torno a 10 A, entre 10,05 A y 9,95 A, triangular	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Triangular y estable en torno a 82,75 V, rizado de 0,7 V	Muy estable en torno a 331 V, triangular, y con un rizado mínimo	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Si todos los condensadores de la entrada son iguales, no hay cambios.
5	Lo anterior y L1_1 de 50u a 500u	Oscila entre +5,5 A y -5 A, un poco más que las demás, aunque es estable	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular	Algo más continua en torno a 10 A, casi inapreciable el cambio, un poco menos de rizado	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Comienza en 82,85 V y baja hasta estabilizarse en 82,7 V	Comienza en 82,65 V, sube un poco y baja hasta estabilizarse en 82,6 V	Comienza en 82,73 V y sube hasta estabilizarse en 82,82 V	Comienza en 82,73 V y sube hasta estabilizarse en 82,82 V	Muy estable en torno a 331 V, triangular, y con un rizado mínimo	Menos rizado en torno a 10 A, estable	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Muy estable en torno a 10, con un rizado de algo menos de 0,5 A	Cuanto menor es el valor de L, la señal de salida es menos continua, oscila más, pero los valores son los mismos
6	Todas las LX_1 a 500u	Oscila entre +5,5 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +5,5 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +5,5 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +5,5 y -5 A, estable y triangular	Algo más continua en torno a 10 A que el caso anterior, algo menos de rizado	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en torno a 82,75 V, con menor rizado	Estable en torno a 82,75 V, con menor rizado	Estable en torno a 82,75 V, con menor rizado	Estable en torno a 82,75 V, con menor rizado	Muy estable en torno a 331 V, triangular, y con un rizado mínimo	Menos rizado aún en torno a 10 A pero es estable	Menos rizado aún en torno a 10 A pero es estable	Menos rizado aún en torno a 10 A pero es estable	Menos rizado aún en torno a 10 A pero es estable	
7	Todas las LX_1 a 100u	Oscila entre +6,5 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +6,5 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +6,5 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +6,5 y -5 A, estable y triangular	Menos continua en torno a 10 A, con más rizado aunque es estable, se aprecia bastante	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,76, mín 82,74 V	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,76, mín 82,74 V	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,76, mín 82,74 V	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,76, mín 82,74 V	Muy estable en torno a 331 V, triangular, y con un rizado mínimo, no se aprecia el cambio	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 13 y mín 7 A	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 13 y mín 7 A	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 13 y mín 7 A	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 13 y mín 7 A	
8	Lo anterior y C1_1 de 50u a 500u	Oscila entre +4,5 A y -3,5 A, un poco menos que las demás, aunque es estable	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular	Oscila entre +5 y -4 A, estable y triangular	Algo más continua en torno a 10 A, casi inapreciable el cambio, un poco menos de rizado	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Comienza en 83,5 V y va bajando hasta estabilizarse en 82,75 V	Comienza en 83,5 V y va bajando hasta estabilizarse en 82,75 V	Comienza en 82 V y va subiendo hasta estabilizarse en 82,75 V	Comienza en 82 V y va subiendo hasta estabilizarse en 82,75 V	Mayor rizado en torno a 331 V pero es estable	Mucho menos rizado (2 A) en torno a 10 A	Mucho rizado (3 A) en torno a 10 A pero es estable	Mucho rizado (3 A) en torno a 10 A pero es estable	Mucho rizado (3 A) en torno a 10 A pero es estable	Cuanto menor es el valor de C de salida, la señal de salida es menos continua, oscila más, pero los valores son los mismos
9	Todos los C1 a 500u	Oscila entre +3,5 y -3,5 A, estable y triangular	Oscila entre +3,5 y -3,5 A, estable y triangular	Oscila entre +3,5 y -3,5 A, estable y triangular	Oscila entre +3,5 y -3,5 A, estable y triangular	Mucho más continua en torno a 10 A que el caso anterior, menos rizado	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en torno a 82,75 V, con menor rizado, máx 82,77, mín 82,73 V	Estable en torno a 82,75 V, con menor rizado, máx 82,77, mín 82,73 V	Estable en torno a 82,75 V, con menor rizado, máx 82,77, mín 82,73 V	Estable en torno a 82,75 V, con menor rizado, máx 82,77, mín 82,73 V	Menor rizado en torno a 331 V. Máx 331,02 V, mín 330,98 V	Mucho rizado (3 A) en torno a 10 A pero es estable	Mucho rizado (3 A) en torno a 10 A pero es estable	Mucho rizado (3 A) en torno a 10 A pero es estable	Mucho rizado (3 A) en torno a 10 A pero es estable	
10	Todos los C1 a 100 u	Oscila entre +3,5 y -3,5 A, estable y triangular	Oscila entre +3,5 y -3,5 A, estable y triangular	Oscila entre +3,5 y -3,5 A, estable y triangular	Oscila entre +3,5 y -3,5 A, estable y triangular	Algo más de rizado en torno a 10 A aunque casi inapreciable	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,8, mín 82,7 V	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,8, mín 82,7 V	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,8, mín 82,7 V	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,8, mín 82,7 V	Más rizado, 331,04 V de máx y 330,96 V de mín, estable en torno a 331 V	Mucho rizado (3,2 A) en torno a 10 A pero es estable	Mucho rizado (3,2 A) en torno a 10 A pero es estable	Mucho rizado (3,2 A) en torno a 10 A pero es estable	Mucho rizado (3,2 A) en torno a 10 A pero es estable	
11	Lo anterior con C1 y L1 todos a 100 u y Rout de 0,1 a 1	En torno a 2 A, máx 6,5 A y mín -5 A	En torno a 2 A, máx 6,5 A y mín -5 A	En torno a 2 A, máx 6,5 A y mín -5 A	En torno a 2 A, máx 6,5 A y mín -5 A	Se estabiliza en 10 A, con poco rizado pero muy estable	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Muy estable aunque con rizado en torno a 85 V, rizado de +/- 0,1 V	Muy estable aunque con rizado en torno a 85 V, rizado de +/- 0,1 V	Muy estable aunque con rizado en torno a 85 V, rizado de +/- 0,1 V	Muy estable aunque con rizado en torno a 85 V, rizado de +/- 0,1 V	Sube hasta los 340 V, muy estable, aceptable	En torno a 10 A, con mucho rizado	En torno a 10 A, con mucho rizado	En torno a 10 A, con mucho rizado	En torno a 10 A, con mucho rizado	Si Rout es más alta, la tensión sube mucho y la corriente baja bastante también, si la Rout es baja, pasará al contrario
12	RL1 de 0,01 a 1, las demas RL a 0,01, Rout a 0,1	En torno a 2 A, máx 6,5 A y mín -5 A	En torno a 2 A, máx 6,5 A y mín -5 A	En torno a 2 A, máx 6,5 A y mín -5 A	En torno a 2 A, máx 6,5 A y mín -5 A	Estable en 10 A, mucho rizado, máx 12,5 A y mín 7,5 A	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Comienza en 77 V y va bajando hasta estabilizarse en 75 V	Estable en 84,75 V, tras un pequeño transitorio	Desde 84,5 V va subiendo hasta estabilizarse en 85,6 V	Desde 84,5 V va subiendo hasta estabilizarse en 85,6 V	Estable en 331 V, rizado de +/- 0,25 V	Estable en 10 A, con mucho rizado, máx 13 A y mín 7 A	Estable en 10 A, con mucho rizado, máx 13 A y mín 7 A	Estable en 10 A, con mucho rizado, máx 13 A y mín 7 A	Estable en 10 A, con mucho rizado, máx 13 A y mín 7 A	Al subir una Resistencia de los cuatro módulos, la corriente no cambia, sin embargo la tensión en ese módulo cae y los otros módulos compensan esa caída

ANEXO II

Análisis de sensibilidad para el control de la tensión de salida de cada módulo con referencia de corriente

Caso	Variable	lin1	lin2	lin3	lin4	Iout	Vin1	Vin2	Vin3	Vin4	VP1_5	VP2_5	VP3_5	VP4_5	Vout	IR1	IR2	IR3	IR4	Conclusiones
1	Desfase de las fuentes del pulso de 45, 90 y 135 grados en los módulos 2,3 y 4 respectivamente	Oscila entre +6 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +6 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +6 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +6 y -5 A, estable y triangular	Tras un transitorio de 0,2 seg, se estabiliza en 10 A con un rizado mínimo	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Oscila en torno a 82,75 V, con carácter sinusoidal, con armónicos, rizado de +/- 0,75 V	Oscila en torno a 82,75 V, con carácter sinusoidal, con armónicos, rizado de +/- 0,75 V	Oscila en torno a 82,75 V, con carácter sinusoidal, con armónicos, rizado de +/- 0,3 V	Oscila en torno a 82,75 V, con carácter sinusoidal, con armónicos, rizado de +/- 0,3 V	Muy estable en torno a 331 V, rizado muy pequeño, prácticamente continua	Muy estable en torno a 10 A tras un transitorio de 0,15 seg, rizado de +/- 3,5 A	Muy estable en torno a 10 A tras un transitorio de 0,15 seg, rizado de +/- 3,5 A	Muy estable en torno a 10 A tras un transitorio de 0,15 seg, rizado de +/- 3,5 A	Muy estable en torno a 10 A tras un transitorio de 0,15 seg, rizado de +/- 3,5 A	El convertidor de partida funciona bastante bien, todo es estable
2	CX_2 a 750µF	Oscila entre +6 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +6 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +6 y -5 A, estable y triangular	Oscila entre +6 y -5 A, estable y triangular	Tras un transitorio de 0,2 seg, se estabiliza en 10 A con un rizado mínimo	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Tras transitorio de 0,1 seg, muy estable en 82,75 V, rizado de +/- 0,1 V	Tras transitorio de 0,1 seg, muy estable en 82,75 V, rizado de +/- 0,1 V	Tras transitorio de 0,1 seg, muy estable en 82,75 V, rizado de +/- 0,1 V	Tras transitorio de 0,1 seg, muy estable en 82,75 V, rizado de +/- 0,1 V	Muy estable en torno a 331 V, rizado muy pequeño, prácticamente continua	Muy estable en torno a 10 A tras un transitorio de 0,15 seg, rizado de +/- 3,5 A	Muy estable en torno a 10 A tras un transitorio de 0,15 seg, rizado de +/- 3,5 A	Muy estable en torno a 10 A tras un transitorio de 0,15 seg, rizado de +/- 3,5 A	Muy estable en torno a 10 A tras un transitorio de 0,15 seg, rizado de +/- 3,5 A	Por debajo de 750u, la respuesta es estable pero diverge en todos los aspectos a partir de 0,4 seg, así que lo dejamos en 750 u
3	C1_2 de 750µF a 720µF	Muy estable hasta 0,25 seg, entre +6 y -5 A, desde ahí empieza a converger, hasta 0,31 seg, que empieza a divergir y converger, haciendo una onda con "burbujas"	Muy estable hasta 0,25 seg, entre +6 y -5 A, desde ahí empieza a converger, hasta 0,31 seg, que empieza a divergir y converger, haciendo una onda con "burbujas"	Muy estable hasta 0,25 seg, entre +6 y -5 A, desde ahí empieza a converger, hasta 0,31 seg, que empieza a divergir y converger, haciendo una onda con "burbujas"	Muy estable hasta 0,25 seg, entre +6 y -5 A, desde ahí empieza a converger, hasta 0,31 seg, que empieza a divergir y converger, haciendo una onda con "burbujas"	Estable en 10 A, hasta 0,25 seg que cae un poco hasta empezar en 0,31 seg a hacerse sinusoidal, en torno a 10 A, con rizado de 5 A	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Empieza estable en 300, a los 0,25 cae y a los 0,31 seg se vuelve sinusoidal en torno a 225 V con la misma frecuencia que la corriente de salida, 17 Hz	Empieza estable en 300, a los 0,25 cae y a los 0,31 seg se vuelve sinusoidal en torno a 225 V con la misma frecuencia que la corriente de salida, 17 Hz	Estable en 82,75 V hasta 0,31 seg, momento en el cual se vuelve sinusoidal, entre 82 y 120 V	Estable en 82,75 V hasta 0,31 seg, momento en el cual se vuelve sinusoidal, entre 82 y 120 V	Estable en 82,75 V hasta 0,31 seg, momento en el cual se vuelve sinusoidal, entre 82 y 42 V	Estable en 82,75 V hasta 0,31 seg, momento en el cual se vuelve sinusoidal, entre 82 y 42 V	Estable en 331 hasta 0,25 seg que empieza a caer hasta 330,4 V y en 0,31 seg se vuelve sinusoidal entre 330,4 V y 331,6 V, no es nada continua pero es estable	Estable hasta 0,25 seg en 10 A, comienza a bajar hasta 5 A hasta 0,31 seg, momento en el cual se vuelve sinusoidal entre 1 y casi 20 A, pero con valor medio de 10 A	Estable hasta 0,25 seg en 10 A, comienza a bajar hasta 5 A hasta 0,31 seg, momento en el cual se vuelve sinusoidal entre 1 y casi 20 A, pero con valor medio de 10 A	Estable hasta 0,25 seg en 10 A, comienza a bajar hasta 5 A hasta 0,31 seg, momento en el cual se vuelve sinusoidal entre 3 y 18 A, pero con valor medio de 10 A	Estable hasta 0,25 seg en 10 A, comienza a bajar hasta 5 A hasta 0,31 seg, momento en el cual se vuelve sinusoidal entre 3 y 18 A, pero con valor medio de 10 A	Con un condensador de entrada algo distinto a los demás (un 10% de diferencia) el sistema aunque tiene cambios, es estable
4	Todos los CX_2 a 750µF y L1_1 de 100µH a 95µH	Es estable en torno a 1 A, con un valor máximo de 6,5 A y uno mínimo de -4,5 A, el rizado es mínimamente mayor que la corriente de los demás módulos	Es estable en torno a 1 A, con un valor máximo de 6,5 A y uno mínimo de -4,5 A	Es estable en torno a 1 A, con un valor máximo de 6,5 A y uno mínimo de -4,5 A	Es estable en torno a 1 A, con un valor máximo de 6,5 A y uno mínimo de -4,5 A	Tras un transitorio de 0,2 seg, es estable en torno a 10 A, aunque a partir de 0,35 seg, tras una perturbación, la onda tiene cada vez más rizado, aunque estable en 10 A	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V hasta 0,3 seg, que empieza a caer muy lentamente	Estable en 300 V hasta 0,3 seg, que empieza a caer muy lentamente	Muy estable en torno a 82,75 V, a los 0,35 seg tiene una perturbación y a partir de entonces el rizado (1 V) va disminuyendo muy poco a poco	Muy estable en torno a 82,75 V, a los 0,35 seg tiene una perturbación y a partir de entonces el rizado (0,9 V) va aumentando muy poco a poco	Muy estable en torno a 82,75 V, a los 0,35 seg tiene una perturbación y a partir de entonces el rizado (0,9 V) va aumentando muy poco a poco	Muy estable en torno a 82,75 V, a los 0,35 seg tiene una perturbación y a partir de entonces el rizado (0,9 V) va disminuyendo muy poco a poco	Tras un transitorio de 0,2 seg, es estable en torno a 331 V, aunque a partir de 0,35 seg, tras una perturbación, la onda tiene cada vez más rizado, aunque estable en 331 V	Tras un transitorio de 0,1 seg, estable en torno a 10 A, con rizado de +/- 3 A, a partir de 0,35 seg, el rizado aumenta muy lentamente	Tras un transitorio de 0,1 seg, estable en torno a 10 A, con rizado de +/- 2,8 A, a partir de 0,35 seg, el rizado aumenta muy lentamente	Tras un transitorio de 0,1 seg, estable en torno a 10 A, con rizado de +/- 2,8 A, a partir de 0,35 seg, el rizado disminuye muy lentamente	Tras un transitorio de 0,1 seg, estable en torno a 10 A, con rizado de +/- 2,8 A, a partir de 0,35 seg, el rizado disminuye muy lentamente	Con una bobina de salida algo distinta a los demás (un 5% de diferencia) el sistema aunque tiene cambios, es estable, y el rizado de las variables de salida es mayor
5	Todas las LX_1 a 50µH	Es estable en torno a 2 A, con un valor máximo de 7,5 A y uno mínimo de -5 A	Es estable en torno a 2 A, con un valor máximo de 7,5 A y uno mínimo de -5 A	Es estable en torno a 2 A, con un valor máximo de 7,5 A y uno mínimo de -5 A	Es estable en torno a 2 A, con un valor máximo de 7,5 A y uno mínimo de -5 A	Muy estable en torno a 10 A, tiene un rizado de 0,11 A	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en torno a 82,75 V, con rizado de 2,5 V	Estable en torno a 82,75 V, con rizado de 2,5 V	Estable en torno a 82,75 V, con rizado de 2,5 V	Estable en torno a 82,75 V, con rizado de 2,5 V	Muy estable y continua en torno a 331 V, rizado mínimo de 0,01 V	Estable en torno a 10 A pero el rizado es de +/- 5 A	Estable en torno a 10 A pero el rizado es de +/- 5 A	Estable en torno a 10 A pero el rizado es de +/- 5 A	Estable en torno a 10 A pero el rizado es de +/- 5 A	Si todas las L de salida son iguales, hay algo más de rizado, pero el sistema trabaja muy bien
6	Todas las LX_1 a 500µH	Comienza a ser estable en torno 1 A a los 0,2 seg, pero a los 0,35 seg, se va a 0,5 A con rizado muy pequeño, de 0,5 A	Comienza a ser estable en torno 1 A a los 0,2 seg, pero a los 0,35 seg, se va a 0,5 A con rizado muy pequeño, de 0,5 A	Comienza a ser estable en torno 1 A a los 0,2 seg, pero a los 0,35 seg, se va a 0,5 A con rizado muy pequeño, de 0,5 A	Comienza a ser estable en torno 1 A a los 0,2 seg, pero a los 0,35 seg, se va a 0,5 A con rizado muy pequeño, de 0,5 A	Tras un transitorio, parece que se va a estabilizar en 10 A pero cae hasta 0,5 A, saturado	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Comienza en 300 V, y empieza a subir hasta 450 V, momento en el que la simulación se corta, pero tiende a seguir subiendo	Comienza en 300 V, y empieza a subir hasta 450 V, momento en el que la simulación se corta, pero tiende a seguir subiendo	Comienza estable en 82,75 V, con poco rizado, pero va ascendiendo hasta 85, y luego en 0,2 empieza a caer. A los 0,5 seg va por 68 y sigue cayendo	Comienza estable en 82,75 V, con poco rizado, pero va ascendiendo hasta 85, y luego en 0,2 empieza a caer. A los 0,5 seg va por 68 y sigue cayendo	Comienza estable en torno a 82,75 V, con mucho rizado y comienza a subir hasta 95 en 0,5 seg, y tiende a seguir subiendo	Comienza estable en torno a 82,75 V, con mucho rizado y comienza a subir hasta 95 en 0,5 seg, y tiende a seguir subiendo	Tras un transitorio de 0,15 seg donde se iba a estabilizar en torno a 331 V, comienza a caer hasta 330,1 a los 0,4 seg, momento en el cual se estabiliza con muy poco rizado	Tras transitorio en el que parece tender a 10 A con poco rizado, a los 0,15 seg empieza a caer hasta prácticamente 0 A	Tras transitorio en el que parece tender a 10 A con poco rizado, a los 0,15 seg empieza a caer hasta prácticamente 0 A	Tras transitorio en el que parece tender a 10 A con mucho rizado, a los 0,15 seg empieza a caer hasta prácticamente 0 A	Tras transitorio en el que parece tender a 10 A con mucho rizado, a los 0,15 seg empieza a caer hasta prácticamente 0 A	Sistema saturado, se vuelve a 50u para las bobinas de salida
7	Todas las L1 a 50 µH y C1_1 de 100µF a 95µF	Sin cambios apreciables, solamente algo más de rizado al final de la simulación	Sin cambios apreciables, solamente algo más de rizado al final de la simulación	Sin cambios apreciables, solamente algo más de rizado al final de la simulación	Sin cambios apreciables, solamente algo más de rizado al final de la simulación	Tras un transitorio de 0,2 seg, es estable en torno a 10 A, aunque a partir de 0,35 seg, tras una perturbación, la onda tiene cada vez más rizado, aunque estable en 10 A	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V hasta 0,3 seg, que empieza a caer muy lentamente	Estable en 300 V hasta 0,3 seg, que empieza a caer muy lentamente	Muy estable en torno a 82,75 V, a los 0,35 seg tiene una perturbación y a partir de entonces el rizado (1 V) va disminuyendo muy poco a poco	Muy estable en torno a 82,75 V, a los 0,35 seg tiene una perturbación y a partir de entonces el rizado (0,9 V) va aumentando muy poco a poco	Muy estable en torno a 82,75 V, a los 0,35 seg tiene una perturbación y a partir de entonces el rizado (0,9 V) va aumentando muy poco a poco	Muy estable en torno a 82,75 V, a los 0,35 seg tiene una perturbación y a partir de entonces el rizado (0,9 V) va disminuyendo muy poco a poco	Tras un transitorio de 0,2 seg, es estable en torno a 331 V, aunque a partir de 0,35 seg, tras una perturbación, la onda tiene cada vez más rizado, aunque estable en 331 V	Tras un transitorio de 0,1 seg, estable en torno a 10 A, con rizado de +/- 2,8 A, a partir de 0,35 seg, el rizado aumenta muy lentamente	Tras un transitorio de 0,1 seg, estable en torno a 10 A, con rizado de +/- 2,8 A, a partir de 0,35 seg, el rizado aumenta muy lentamente	Tras un transitorio de 0,1 seg, estable en torno a 10 A, con rizado de +/- 2,8 A, a partir de 0,35 seg, el rizado disminuye muy lentamente	Tras un transitorio de 0,1 seg, estable en torno a 10 A, con rizado de +/- 2,8 A, a partir de 0,35 seg, el rizado disminuye muy lentamente	En cuanto hay un condensador algo distinto (5%), el sistema presenta algunos cambios mínimos, pero es estable, con un rizado algo mayor
8	Todos los C1 a 50µF	Es estable en torno a 2 A, con un valor máximo de 7,5 A y uno mínimo de -5 A	Es estable en torno a 2 A, con un valor máximo de 7,5 A y uno mínimo de -5 A	Es estable en torno a 2 A, con un valor máximo de 7,5 A y uno mínimo de -5 A	Es estable en torno a 2 A, con un valor máximo de 7,5 A y uno mínimo de -5 A	Muy estable en torno a 10 A, tiene un rizado de 0,2 A	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en torno a 82,75 V, con rizado de 0,25 V	Estable en torno a 82,75 V, con rizado de 0,25 V	Estable en torno a 82,75 V, con rizado de 0,25 V	Estable en torno a 82,75 V, con rizado de 0,25 V	Menos continua en torno a 331 V pero es estable. Máx 331,02 V, mín 330,98 V	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 15 y mín 5 A	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 15 y mín 5 A	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 15 y mín 5 A	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 15 y mín 5 A	Si todos los condensadores de salida son iguales y pequeños, el sistema trabaja uy bien, muy estable y con poco rizado
9	Todos los C1 a 500 µF	Estable en torno a 1 A, con mucho rizado +/- 6 A, y va aumentando al final de la simulación	Estable en torno a 1 A, con mucho rizado +/- 6 A, y va aumentando al final de la simulación	Estable en torno a 1 A, con mucho rizado +/- 6 A, y va aumentando al final de la simulación	Estable en torno a 1 A, con mucho rizado +/- 6 A, y va aumentando al final de la simulación	Muy estable en 10 A, el rizado es muy pequeño pero empieza a aumentar considerablemente al final de la simulación	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	300 V continua, al final de la simulación comienza a caer lentamente	300 V continua, al final de la simulación comienza a caer lentamente	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,78, mín 82,72 V	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,78, mín 82,72 V	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,78, mín 82,72 V	Estable en torno a 82,75 V, con mayor rizado, máx 82,78, mín 82,72 V	Muy estable en 331 V, el rizado es muy pequeño pero empieza a aumentar al final de la simulación	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 15 A y mín 5 A	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 15 A y mín 5 A	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 15 A y mín 5 A	Mucho rizado en torno a 10 A pero es estable, máx 15 A y mín 5 A	En el caso del condensador de salida, su valor puede ser alto, pero es preferible uno pequeño para que sea muy estable
10	Lo anterior con C1 y L1 todos a 50 µF y Rout de 0,1 a 1 Ω	Tras un transitorio de 0,2 seg, la onda tiende a converger hasta estabilizarse en 0,45 seg en torno a 1 A, con rizado pequeño (2 A)	Tras un transitorio de 0,2 seg, la onda tiende a converger hasta estabilizarse en 0,45 seg en torno a 1 A, con rizado pequeño (2 A)	Tras un transitorio de 0,2 seg, la onda tiende a converger hasta estabilizarse en 0,45 seg en torno a 1 A, con rizado pequeño (2 A)	Tras un transitorio de 0,2 seg, la onda tiende a converger hasta estabilizarse en 0,45 seg en torno a 1 A, con rizado pequeño (2 A)	Tras un transitorio de 0,2 seg, en el que tiene a oscilar en trono a 10 A, la corriente cae hasta 1,75 A, estabilizándose a los 0,45 seg	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Comienza en 300 V, y empieza a subir hasta 450 V, momento en el que la simulación se corta, pero tiende a seguir subiendo	Comienza en 300 V, y empieza a subir hasta 450 V, momento en el que la simulación se corta, pero tiende a seguir subiendo	Sinusoidal hasta 0,2 seg en torno a 86 V, despues de esto, comienza a caer, en 0,5 seg va por 72 V	Sinusoidal hasta 0,2 seg en torno a 86 V, despues de esto, comienza a caer, en 0,5 seg va por 72 V	Comienza estable en 84 V y empieza a crecer sin oscilar, a los 0,5 seg va por 94 V	Comienza estable en 84 V y empieza a crecer sin oscilar, a los 0,5 seg va por 94 V	Comienza oscilando en torno a 340 V, pero a los 0,2 seg comienza a bajar hasta 331 donde se queda estable tras 0,5 seg	Comienza sinusoidal en torno a 10 A, a los 0,2 seg comienza a caer hasta estabilizarse en torno a 3 A, siendo discontinua, quedándose en 0 largos periodos a partir de 0,45 seg	Comienza sinusoidal en torno a 10 A, a los 0,2 seg comienza a caer hasta estabilizarse en torno a 3 A, siendo discontinua, quedándose en 0 largos periodos a partir de 0,45 seg	Comienza sinusoidal en torno a 10 A, a los 0,2 seg comienza a caer hasta estabilizarse en torno a 3 A, siendo discontinua, quedándose en 0 largos periodos a partir de 0,45 seg	Comienza sinusoidal en torno a 10 A, a los 0,2 seg comienza a caer hasta estabilizarse en torno a 3 A, siendo discontinua, quedándose en 0 largos periodos a partir de 0,45 seg	La corriente se descontrola totalmente mientras que la tensión de salida total es estable, aunque la tensión de cada módulo no está controlada tampoco
11	Rout a 0,1 Ω, RLX a 0,1 Ω	En torno a 2 A, máx 7,5 A y mín -5 A	En torno a 2 A, máx 7,5 A y mín -5 A	En torno a 2 A, máx 7,5 A y mín -5 A	En torno a 2 A, máx 7,5 A y mín -5 A	Estable en 10 A, tras transitorio de 0,22 seg, rizado de 0,2 A	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	Tras transitorio de 0,22 seg, se estabiliza en 82,75 V con rizado de +/- 0,5 V	Tras transitorio de 0,22 seg, se estabiliza en 82,75 V con rizado de +/- 0,5 V	Tras transitorio de 0,22 seg, se estabiliza en 82,75 V con rizado de +/- 0,5 V	Tras transitorio de 0,22 seg, se estabiliza en 82,75 V con rizado de +/- 0,5 V	Estable en 331 V, rizado de +/- 0,02 V, transitorio de 0,22 seg	Estable en 10 A, con mucho rizado, máx 15 A y mín 5 A	Estable en 10 A, con mucho rizado, máx 15 A y mín 5 A	Estable en 10 A, con mucho rizado, máx 15 A y mín 5 A	Estable en 10 A, con mucho rizado, máx 15 A y mín 5 A	Una respuesta muy buena
12	RL1 a 0,12 Ω, RL2 a 0,09 Ω, RL3 a 0,11 Ω y RL4 a 0,085 Ω	En torno a 2 A, máx 6 A y mín -4,5 A, al final de la siumulacion, a los 0,5 seg, el rizado baja considerablemente	En torno a 2 A, máx 6 A y mín -4,5 A, al final de la siumulacion, a los 0,5 seg, el rizado baja considerablemente	En torno a 2 A, máx 6 A y mín -4,5 A, al final de la siumulacion, a los 0,5 seg, el rizado baja considerablemente	En torno a 2 A, máx 6 A y mín -4,5 A, al final de la siumulacion, a los 0,5 seg, el rizado baja considerablemente	Comienza estable en 10 A, pero mediante va pasando el tiempo, el rizado se va haciendo mayor, hasta que cae la corriente en torno a 0,45 seg	Estable en 300 V, totalmente continua	Estable en 300 V, totalmente continua	300 V al principio, pero comienza a subir de forma exponencial, en 0,5 seg va por 350 V	300 V al principio, pero comienza a subir de forma exponencial, en 0,5 seg va por 350 V	Estable al comienzo en 82,75 V, con rizado de 0,2 V, pero se descontrola llegando al final de la simulación	Estable al comienzo en 82,75 V, con rizado de 0,2 V, pero se descontrola llegando al final de la simulación	Estable al comienzo en 82,75 V, con rizado de 0,2 V, pero se descontrola llegando al final de la simulación	Estable al comienzo en 82,75 V, con rizado de 0,2 V, pero se descontrola llegando al final de la simulación	Misma forma de onda que la corriente de salida Iout, pero en torno a 331 V	En torno a 10 A, estable, rizado de +/- 5 A, pero llegando al final, cae	En torno a 10 A, estable, rizado de +/- 5 A, pero llegando al final, cae	En torno a 10 A, estable, rizado de +/- 5 A, pero llegando al final, cae	En torno a 10 A, estable, rizado de +/- 5 A, pero llegando al final, cae	Si todas las RL son iguales, todo va bien, pero en cuanto hay cambios, el sistema es estable muy poco tiempo, despues se descontrola



ANEXO III

Análisis de sensibilidad para el control de la recarga de la batería auxiliar de 12 V

Caso	Variable	Iin4	IR4	Iout_aux	Vin4	VP4_5	Vout_aux	Conclusiones
1	Convertidor de partida	Tras el transitorio de la conexión, se queda en régimen permanente con un valor medio de 0,16 A, aunque con un rizado de 2 A	Tras el transitorio de la conexión, llega a régimen permanente de 4 A, aunque con un rizado de 1,6 A	Tras la realización de la conexión, tras un transitorio, se mantiene estable en 4 A, con rizado de 0,7 A	330 V continua totalmente desde la conexión	Hasta la conexión está en 82,75 V, desde la conexión se sitúa en 14,4 V, el valor nominal. Rizado de 0,1 V, mínimo	Tras un picotazo de tensión en la conexión, se mantiene estable en el valor nominal de 14,4 V. Rizado de 0,1 V, mínimo.	Con el convertidor tal y como debería de estar, todo tiene un funcionamiento satisfactorio
2	C4_2 de 750µF a 500µF	Tras el transitorio de la conexión, se queda en régimen permanente con un valor medio de 0,16 A, aunque con un rizado de 2 A	Tras el transitorio de la conexión, llega a régimen permanente de 4 A, aunque con un rizado de 1,6 A	Tras la realización de la conexión, tras un transitorio, se mantiene estable en 4 A, con rizado de 0,7 A	Pese a que el sistema antes de la conexión no es estable, tras la conexión Vin 4 es 330 V continua	El sistema a la salida del módulo es estable, con la tensión en 14,4 V con muy poco rizado (0,1 V) prácticamente continua	Ocurre lo mismo que a la salida del módulo, aunque con mucho menos rizado, de apenas 0,04 V	Aunque el condensador de entrada sea muy distinto al inicial, el sistema, al menos para la carga de la batería auxiliar, funciona correctamente.
3	C4_2 de 500µF a 100µF	Tras el transitorio de la conexión, se queda en régimen permanente con un valor medio de 0,16 A, aunque con un rizado de 2 A	Tras el transitorio de la conexión, llega a régimen permanente de 4 A, aunque con un rizado de 1,6 A	Tras la realización de la conexión, tras un transitorio, se mantiene estable en 4 A, con rizado de 0,7 A	Pese a que el sistema antes de la conexión no es estable, tras la conexión Vin 4 es 330 V continua	El sistema a la salida del módulo es estable, con la tensión en 14,4 V con muy poco rizado (0,1 V) prácticamente continua	Ocurre lo mismo que a la salida del módulo, aunque con mucho menos rizado, de apenas 0,04 V	
4	L4_1 de 50µH a 10µH	Tras el transitorio de la conexión, se queda en régimen permanente con un valor medio de 0,16 A, aunque con un rizado de 2 A	Tras el transitorio de la conexión, llega a régimen permanente de 4 A, aunque con un rizado de 1,6 A	Se mantiene estable en 4 A aunque el rizado es algo mayor, de 1,1 A	330 V continua totalmente desde la conexión	El sistema a la salida del módulo es estable, con la tensión en 14,4 V con muy poco rizado (0,1 V) prácticamente continua	Ocurre lo mismo que a la salida del módulo, aunque el rizado es más grande, de 0,1 V	Al bajar el valor de la bobina de salida, el rizado aumenta, aunque muy poco. Ocurre lo contrario al subir el valor de la bobina
5	L4_1 de 10µH a 100µH	Tras el transitorio de la conexión, se queda en régimen permanente con un valor medio de 0,16 A, aunque con un rizado de 2 A	Salida de 4 A en forma triangular con un rizado menor, de 1,1 A	Se mantiene estable en 4 A aunque el rizado es menor, de 0,5 A	330 V continua totalmente desde la conexión	El sistema a la salida del módulo es estable, con la tensión en 14,4 V con un rizado menor(0,05 V) prácticamente continua	El sistema a la salida es estable, con la tensión en 14,4 V con un rizado menor(0,05 V) prácticamente continua	
6	C4_1 de 50µF a 10µF, L4_1 a 10µH	Sube un poco el valor medio, a 0,175 A, aunque el rizado es el mismo	Baja un poco el valor medio, a 3,92 A, el rizado es de 1,5 A	Baja un poco el valor medio, a 3,92 A, el rizado es de 1,5 A	330 V continua totalmente desde la conexión	La tensión a la salida del módulo es la nominal, aunque el rizado aumenta a 0,12 V	La tensión a la salida es la nominal, aunque el rizado aumenta a 0,12 V	Cuanto mayor es el valor de cada componente del filtro LC, menor el rizado a la salida, aunque los cambion no son significativos. Por el contrario, una diferencia muy grande entre las magniutdes es la bobina y el condensador, dan peor resultado.
7	C4_1 de 10µF a 100µF, L4_1 a 100µH	La corriente de entrada tiene un valor medio de 0,17 A, el rizado es de aproximadamente 2 A	Valor medio de 4 A con un rizado de 1,1 A	Valor medio 4 A, con un rizado de 0,25 A	330 V continua totalmente desde la conexión	14,4 V de valor medio con un rizado de 0,03 V	14,4 V de valor medio con un rizado de 0,03 V	
8	C4_1 a 100µF y L4_1 a 10µH	Sube el valor medio a 0,188 A, rizado de aprox. 2 A	Valor medio de 4 A, con un rizado de 1,3 A	Valor medio de 4 A, con un rizado de 0,7 A	330 V continua totalmente desde la conexión	14,4 V de valor medio con un rizado de 0,035 V	14,4 V de valor medio con un rizado de 0,035 V	
9	Rout de 0,1Ω a 0,01Ω	Valor medio de 0,165 A, con rizado de 2,5 A	Valor medio de 4 A con rizado de 1,6 A	Valor medio de 4 A con rizado de 1,6 A, pico en el transitorio muy grande, de 5 kA	330 V continua totalmente desde la conexión	14,04 V de vaor medio con un rizado de 0,015 V	14,04 V de vaor medio con un rizado de 0,015 V	Es preferible una resistencia muy baja, ya que el rizado es aceptable pero los valores se manienten en lo nominal, con valores altos, la tensión a la salida se dispara
10	Rout de 0,01Ω a 1Ω	Valor medio de 0,21 A con rizado de 2,8 A	Valor medio de 4,06 A con rizado de 2 A	Valor medio de 4 A con rizado de 0,1 A	330 V continua totalmente desde la conexión	18 V de valor medio, con un rizado de 0,1 V	18 V de valor medio, con un rizado de 0,1 V	
11	RL4 de 0,01Ω a 0,1Ω; Rout a 0,1Ω	Valor medio de 0,174, rizado de 2,5 A	Valor medio de 4 A con rizado de 1,8 A	Valor medio de 4 A con rizado de 0,8 A	330 V continua totalmente desde la conexión	14,4 V de valor medio con un rizado de 0,03 V	14,4 V de valor medio con un rizado de 0,03 V	
12	Caso definitivo: C2=750u C1=50u L1=50u Rout=0,1 RL=0,01	Valor medio de 0,162 A, con rizado de 2,8 A	Valor medio de 4 A, onda triangular, con rizado de 1,5 A	Valor medio de 4 A con rizado de 0,8 A	330 V continua totalmente desde la conexión	14,4 V de valor medio con un rizado de 0,02 V	14,4 V de valor medio con un rizado de 0,03 V	Resultado óptimo con estas condiciones



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Página web de Mitsubishi Motors: www.mitsubishi-motors.es (última visita, 20 de Agosto de 2014)
- [2] G. Ledwich. *Buck Boost Basics* [en línea]. [Consulta: 15 de Junio de 2014]. Disponible en: www.otherpower.com
- [3] Kassiopea. *El primer coche eléctrico de la historia* [blog], 3 de Abril de 2011. [Consulta: 28 de Julio de 2014]. Disponible en: www.paseandoporlahistoria.blogspot.com
- [4] Ioinovici, Adrian. *Power Electronics and Energy Conversion Systems Volume I*. Chichester, Reino Unido: Ed. Wiley, 2013
- [5] Kolar, J.W. *Benefits of MC Solutionsfor EnergyEfficiency Targets* [en línea]. [Consulta 20 de Julio de 2014]. Disponible en: www.pes.ee.ethz.ch
- [6] Trenchs Magaña, Albert. *Diseño de un Convertidor DC/DC Auxiliar para un Vehículo Eléctrico*. Junio, 2011
- [7] Departamento de electrónica, Universidad de Alcalá. *Convertidores DC/DC conmutados* [en línea]. [Consulta: 17 de Junio de 2014]. Disponible en: www.depeca.uah.es
- [8] Página web www.km77.com (última visita 20 de Agosto de 2014)

